

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

LIBRAIRIE BÉRANGER

- Traité des Gîtes minéraux et métallifères**, par FUCHS et DE LAUNAY, 2 vol.
grand in-8° de cxii-824 et 1.004 p. (1893) 60 fr.
- Les Mines d'or du Transvaal**. 1 vol. grand in-8° de xxxii-540 p. (1896) 15 fr.
- Les Diamants du Cap**. 1 vol. in-8° de 226 p. (1897). 10 fr.
- Les Sources thermominérales**. 1 vol. grand in-8° de x-636 p. (1899). 25 fr.
- Les Richesses minérales de l'Afrique**. 1 vol. gr. in-8° de 396 p. (1903). 20 fr.
- La Métallogénie de l'Italie et des régions avoisinantes**. 1 vol. in-8° de
146 p. (1906) 15 fr.
- La Géologie et les Richesses minérales de l'Asie**. 1 vol. grand in-8° de 816 p.
et 10 pl. (1911) 35 fr.
-

- Formation des Gîtes métallifères** (1^{re} édition 1893 ; 2^e édition, 1905). 1 vol.
in-16, chez Gauthier-Villars (1905). 3 fr.
- Statistique des Gîtes métallifères**. 1 vol. in-16, chez Gauthier-Villars
(1894). 3 fr.
- L'Argent**. 1 vol. in-16, chez Baillièrè (1895). 4 fr.
- La Science géologique**. 1 vol. in-8° de 752 p., chez Armand Colin (1^{re} édition
1905 ; 2^e édition 1912). 20 fr.
- L'Or dans le monde**. 1 vol. in-16 de 266 p., chez Armand Colin (1907). 3 fr. 50
- Géologie pratique**. 1 vol. in-18 de 344 p., chez Armand Colin. (1^{re} édition 1901 ;
2^e édition 1909). 3 fr. 50
- Histoire de la Terre** (10^e mille). 1 vol. in-16 de 312 p., chez Flammarion
(1907) 3 fr. 50
- La Conquête minérale** (4^e mille). 1 vol. in-16 de 390 p., chez Flammarion
(1908) 3 fr. 50
- Contribution à l'Étude des Gîtes métallifères**. 1 vol. in-8°, chez Dunod
(1899). 4 fr.
-

TRAITÉ DE MÉTALLOGÉNIE

GÎTES MINÉRAUX

ET

MÉTALLIFÈRES

GISEMENTS, RECHERCHE,
PRODUCTION ET COMMERCE DES MINÉRAUX UTILES
ET MINÉRAIS,
DESCRIPTION DES PRINCIPALES MINES

PAR

L. DE LAUNAY

Membre de l'Institut.
Ingénieur en Chef des Mines,
Professeur à l'École supérieure des Mines,
et à l'École des Ponts et Chaussées.

TOME PREMIER

PARIS ET LIÈGE

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE CH. BÉRANGER, ÉDITEUR

PARIS, 15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE, 21

1913

Tous droits réservés.

PRÉFACE

Un ouvrage, ayant le même objet général que celui-ci et portant un titre analogue, a déjà été publié par nous il y a près de vingt ans en mettant alors à profit, avec nos propres observations, les notes de notre regretté prédécesseur Edmond Fuchs, qui, après sa mort, nous avaient été confiées. Ce nouveau *Traité des gîtes minéraux et métallifères* n'a cependant rien d'une seconde édition, si largement « refondue et corrigée » qu'on la suppose. Il suffira du premier coup d'œil jeté sur lui pour constater qu'il est presque entièrement différent de son aîné par son plan, par ses idées, par ses développements. Les théories générales, qui comportent l'exposé de nos travaux personnels sur la métallogénie, y ont pris une place très importante. Les matériaux autrefois utilisés ont été remaniés de fond en comble et condensés autant que possible. En revanche, de nombreux matériaux nouveaux ont été ajoutés qui, malgré tout notre désir d'être bref et malgré les efforts faits pour réduire matériellement la place occupée par les notes et la bibliographie, doublent à peu près les dimensions du travail primitif. Enfin, quoique nous ayons supprimé beaucoup d'anciennes figures, le nombre des figures est devenu également presque double de ce qu'il était. Le temps qui s'est écoulé entre la publication de ces deux travaux a été, en effet, marqué, pour la science spéciale de la métallogénie que nous étudions ici, par un effort considérable, par un mouvement d'idées, par un entassement de publications dans le monde entier, qui ont complètement renouvelé le sujet. Des revues spéciales se sont fondées en divers pays pour traiter les questions qui s'y rapportent. Des montagnes de livres et de mémoires se sont accumulées. Nous-même, malgré l'isolement auquel nous condamnons l'organisation des études et de l'enseignement en France, avons essayé, comme nous le rappellerons bientôt, d'apporter notre contribution à ce labeur universel. Il est inutile d'ajouter que tout ce qui se rapporte à l'industrie, à la statistique, au commerce, aux sources et aux débouchés des matières minérales, — questions pratiques auxquelles nous attachons une très grande importance, — a subi, en près d'un quart de siècle, une transformation profonde.

Notre programme très vaste comporte un exposé méthodique de toutes les richesses quelconques, solides, liquides ou même gazeuses, que le monde minéral offre à l'activité humaine; et, comme en dernière analyse, le monde minéral est la source première de tous nos éléments chimiques, nous serons amenés à faire incidemment une sorte de *géologie chimique*, ou *géochimie*, formant le pendant des recherches sur la mécanique géologique, ou tectonique, qui ont surtout attiré l'attention dans ces dernières années: une étude d'ensemble sur les conditions dans lesquelles les éléments chimiques se sont concentrés anormalement en des points d'élection, où cette concentration anormale nous invite à aller les chercher et nous permet de les exploiter fructueusement. Ce que nous étudierons ainsi, ce sera leur *métallurgie naturelle*. De ce programme si considérable, nous ne laisserons guère ici que deux parties de côté: l'une parce que nous lui avons déjà consacré un ouvrage spécial, c'est la question des eaux souterraines; l'autre parce que nous essaierons peut-être un jour de la traiter isolément, c'est la géologie des combustibles minéraux. Pour le reste, depuis les gaz de l'air jusqu'au pétrole ou au platine, produits métallifères ou non métallifères, nous nous efforcerons autant que possible de ne rien omettre¹.

Ces études de chimie géologique peuvent, à bien des égards, ce nous semble, apporter un utile concours à la géologie des laboratoires, de même que les résultats obtenus par celle-ci nous seront constamment indispensables. Il est, en effet, une foule de questions qui ne peuvent être résolues qu'en étudiant directement la nature et les résultats obtenus par elle, non plus dans un champ d'action restreint, dans des intervalles de temps très courts et avec des forces limitées, mais dans des conditions d'homogénéité, d'amplitude et de durée, qu'il nous est impossible de reproduire ou d'imiter. Comme on l'a fait depuis longtemps remarquer pour les synthèses de minéraux, aucune explication de pure chimie n'a de valeur pour l'interprétation d'une formation minérale quelconque si elle ne rend pas compte de tout un ensemble de circonstances naturelles, accessoires en apparence, souvent essentielles en réalité, que notre but est précisément ici d'étudier.

Nous commencerons par quelques chapitres de généralités, où nous nous contenterons d'un rappel sommaire pour toute une série de notions

¹ Nous nous excusons d'avance de toutes les erreurs que nous n'avons pu manquer de commettre en touchant à tant de matières si diverses et à tant de questions industrielles, au sujet desquelles les renseignements sont souvent si difficiles à obtenir. Même matériellement, ayant seul relu les épreuves de ce long ouvrage, nous avons dû laisser échapper bien des lapsus et bien des fautes. Nous serons très reconnaissant aux lecteurs qui voudront bien, en nous les signalant, nous fournir les éléments d'un nécessaire errata.

qui tiennent d'ordinaire une grande place dans les ouvrages similaires, mais que, pour cette raison même, nous supposons suffisamment familières à nos lecteurs. Les principes de métallogénie, par lesquels nous débiterons, ne sont pas destinés à remplacer l'un de ces traités généraux où sont exposées les règles pratiques et empiriques que l'expérience des mineurs a formulées relativement à la manière de rechercher les minerais dans leurs gisements. On y trouvera sans doute sommairement traitées les principales de ces questions. Mais, plutôt que d'insister sur des observations ou sur des théories devenues classiques, plutôt également que de répéter ce que nous-même avons déjà eu l'occasion de dire dans d'autres ouvrages, nous préférons mettre en lumière certains côtés nouveaux de ces mêmes problèmes et présenter nos observations dans un ordre qui fera mieux ressortir l'importance de ces aperçus nouveaux.

C'est ainsi que nous nous arrêterons peu sur le côté mécanique des dislocations filoniennes, sur la forme des gisements, leurs coinements, leurs rejets, etc. : toutes études dont nous sommes loin d'ailleurs de méconnaître l'utilité pratique. Nous développerons, au contraire, nos idées personnelles sur les opérations métallurgiques auxquelles est due la localisation des métaux, sur les rapports chimiques des métaux entre eux, sur les modifications originelles des gisements en profondeur, sur les types régionaux de gîtes métallifères et sur ce que nous appelons les provinces métallogéniques, enfin sur le rôle (à notre avis, essentiel) des remises en mouvement, et des altérations secondaires. Nous chercherons, d'une façon générale, à mettre en évidence le contre-coup que les théories nouvelles de la géologie tectonique, de la chimie, de la physique, ont nécessairement sur cette science latérale, à laquelle nous avons proposé de donner le nom de *Métallogénie*.

Nous aborderons ensuite la description méthodique des divers gisements, pour laquelle nous avons cru devoir conserver en principe, et sauf des modifications de détail, l'ordre des éléments chimiques classés d'après leurs affinités, ainsi que nous l'avions fait dans notre premier ouvrage. Sans doute cet ordre a l'inconvénient de séparer parfois artificiellement des gisements analogues, dans lesquels dominant ici un métal, là un autre, et d'amener par suite, si on veut être complet, quelques répétitions ; mais, outre qu'il correspond le plus souvent aux nécessités pratiques, il est également propre à faciliter les études de géologie chimique, auxquelles nous attachons un intérêt tout spécial. Du reste, l'ordre géographique, qui nous aurait mieux permis de mettre en évidence les provinces métallogéniques, a déjà été suivi par nous dans une série d'autres travaux, avec lesquels celui-ci ne doit pas faire double emploi : sur les richesses minérales de l'Afrique, de l'Asie, de

L'Italie, de la Scandinavie, du Mexique, de la chaîne hercynienne européenne, etc.¹. Et la classification par types de gisements, qui est la plus généralement adoptée dans les ouvrages étrangers, et dont nos chapitres du début donnent un aperçu, offre, malgré de sérieux avantages, le grave défaut de disséminer les descriptions relatives aux gisements d'une même substance, suivant un système nécessairement un peu hypothétique et arbitraire. Elle est, par suite, fort peu pratique et ne se serait pas prêtée à une étude que nous croyons essentielle sur les conditions économiques et commerciales propres à chaque substance. Enfin on nous permettra d'ajouter qu'elle convenait moins à l'exposé de nos vues nouvelles, qui se rapportent, pour la plupart, à une autre manière d'envisager le sujet.

L'ordre suivi dans l'étude successive de chacun des éléments chimiques apparaîtra suffisamment en parcourant un chapitre quelconque du livre.

Nous indiquons d'abord les divers composés utiles de chaque élément chimique. Nous prenons ensuite chacun d'eux séparément pour donner : 1° ses applications et ses débouchés ; 2° ses centres de production et sa statistique.

Nous croyons essentiel de résumer, à ce propos, pour chaque corps étudié, ses principaux emplois : la recherche d'un corps n'étant intéressante en pratique que dans la mesure où il trouve des acheteurs, et l'exploitation minière d'une substance étant directement régie par cette question commerciale, dont dépendent son prix et les limites en teneur de ses minerais. Cependant, dans cet ordre d'idées, nous ne jugeons pas utile d'insister sur le côté technique, qui est traité dans divers ouvrages de chimie industrielle, et c'est surtout le côté économique de la question, pour lequel les éléments sont beaucoup plus difficiles à réunir et à grouper, qui nous occupera².

Nous abordons alors : 3° la description des gisements³, groupés eux-

¹ Les titres complets de ces ouvrages, que nous aurons souvent l'occasion de citer en abrégé, sont les suivants : 1903. *Les Richesses minérales de l'Afrique* (1 vol. de 396 p. Paris, Béranger). — 1903. *L'origine et les caractères des gisements de fer scandinaves* (Annales des Mines. 165 p. et 6 pl.). — 1906. *La métallogénie de l'Italie et des régions avoisinantes* (1 vol. de 144 p. et 1 pl. Paris, Béranger). — 1911. *La Géologie et les Richesses minérales de l'Asie* (1 vol. de 816 p. et 10 pl. Paris, Béranger). — 1911. *Les minerais stratiformes de la chaîne hercynienne* (Annales des Mines. 100 p. et 2 pl.).

² Il pourrait y avoir lieu de traiter à ce propos le développement historique de l'industrie minière, ses conditions économiques générales, etc. Pour ce côté du sujet, voir *Ma Conquête minérale* (Bibl. de philosophie scientifique. Flammarion, 1909).

³ Nous renverrons fréquemment, par le numéro d'ordre des échantillons, à la collection spéciale consacrée aux gîtes minéraux et métallifères à l'École des Mines.

mêmes, s'il y a lieu, suivant le principe de notre classification théorique, en : a) Gîtes d'inclusions, de ségrégation ignée, de départ immédiat et d'imprégnation diffuse; b) gîtes hydrothermaux filoniens; c) gîtes d'altération sur place; d) gîtes de remaniement et de précipitation mécanique ou chimique.

Les illustrations, cartes et plans ont été multipliés autant que possible pour faciliter la lecture d'un livre où la géographie tient autant de place. Toute une série d'index alphabétiques et de tables permettent de retrouver une indication concernant, ou une question déterminée, ou une mine donnée, ou les divers gisements d'une même région, ou ceux d'une même substance en divers pays, ou encore ceux du même type avec métaux différents¹.

Pour la bibliographie qui tient nécessairement une grande place dans un ouvrage de documentation comme celui-ci, nous avons visé moins à être complet qu'à être utile. C'est pourquoi nous avons surtout développé les indications relatives aux ouvrages récents. Les publications plus anciennes, auxquelles on aura rarement besoin de recourir, ont été négligées de parti pris quand elles n'avaient pas un intérêt de premier ordre, afin de ne pas allonger indéfiniment des notes déjà trop longues². Nous avons cru pouvoir, à cet égard, renvoyer d'une manière générale à notre premier ouvrage sur les *Gîtes métallifères*, où cette bibliographie ancienne avait été très soignée, pensant que le lecteur désireux de se renseigner à fond sur un sujet déterminé, le ferait dans une bibliothèque publique, où il trouverait ce livre à sa disposition³.

* * *

En terminant ce préambule il nous sera peut-être permis d'indiquer aussitôt très brièvement les points principaux par lesquels notre théorie actuelle des gîtes métallifères diffère de celle qui était couramment professée il y a une trentaine d'années et de rappeler en quelques mots l'historique de nos travaux.

¹ On trouvera, à la fin du tome III, les tables, index alphabétiques, tableau des mesures usitées dans les divers pays, etc.

² L'une des tables insérées à la fin du tome III donne les abréviations adoptées dans nos notes bibliographiques. On remarquera que, contrairement à un usage malheureux, les tomaisons sont indiquées par nous en chiffres arabes et non en chiffres romains, qui tiennent plus de place en étant moins lisibles. Comme autre dérogation aux habitudes, nos compatriotes voudront bien nous excuser si, conformément à la coutume étrangère, nous avons supprimé devant leur nom le « Monsieur » qui, en France, établit une division entre les vivants et les morts.

³ Diverses publications donnent des bibliographies périodiques relatives aux gîtes métallifères. On pourra consulter les *Annales des Mines*, la *Zeitschrift für praktische Geologie*, l'*Economic Geology*, la *Mineral Industry*, le *Geologisches Zentralblatt*.

Les changements que nous avons apportés à la métallogénie se rapportent à deux groupes de phénomènes : 1° constitution primitive des gisements ; 2° transformations ultérieures. Introduites dans notre enseignement à l'École des Mines à partir de 1889, ces idées nouvelles ont été successivement exposées : dans un livre sur la *Formation des Gîtes Métallifères* paru en 1893 et surtout dans sa seconde édition, entièrement refondue, de 1905 ; dans un mémoire de 1897 aux Annales des Mines, intitulé *Contribution à l'Étude des Gîtes Métallifères* ; dans un mémoire de 1903 au même recueil : *Notes sur la théorie des Gîtes Minéraux* ; dans divers articles à la Revue Générale des Sciences : *Sur les variations des filons métallifères en profondeur* (5 mai 1900) ; *Sur la distribution des éléments chimiques dans l'Écorce terrestre* (30 novembre 1902) ; *Sur la classification métallogénique des corps simples* (30 août 1911) ; dans les chapitres relatifs à la métallogénie de la *Science Géologique* (1905) ; dans les *Richesses minérales de l'Afrique* (1903) ; dans la *Métallogénie de l'Italie* (1906) ; enfin dans un ouvrage de 1911 sur la *Géologie et les Richesses minérales de l'Asie*, qui est l'exposé méthodique de notre théorie des provinces régionales, appliquée au Continent asiatique.

1° Constitution primitive des gisements. — On établissait autrefois des cloisons étanches ; d'une part, entre les manifestations ignées de la pétrographie et les gîtes métallifères, où l'on voyait à peu près exclusivement des produits filoniens de dépôts hydrothermaux ; d'autre part, entre les gisements des divers métaux que, sous l'influence de considérations industrielles, on envisageait comme totalement distincts les uns des autres, ou du moins comme répartis par petits groupes absolument indépendants. Nous avons montré, au contraire, qu'il y avait là une série continue, dans laquelle nous nous sommes attaché à mettre en évidence et à étudier le rôle des associations.

Tout d'abord, pour passer des roches ignées aux gîtes métallifères nous avons, depuis 1890, introduit dans notre enseignement la notion des inclusions et ségrégations métallifères, appliquant ainsi aux métaux les résultats antérieurement acquis par les pétrographes ¹. Nous avons montré depuis comment certains gîtes de contact igné et certains types de gisements, pour lesquels nous avons proposé le nom d'imprégnations diffuses, formaient le passage des ségrégations magmatiques aux filons ².

En ce qui concerne les associations métalliques, nous avons fait voir qu'il n'y avait pas, comme on le croyait, venues absolument indépen-

¹ Voir plus loin, chapitre IV, tome I, p. 73.

² Tome I, page 83, et suiv.

dantes des divers métaux, mais passages constants des uns aux autres avec des transitions qui amènent successivement du type stannifère au type cuprifère, puis plombifère et enfin mercuriel. Nous nous sommes attaché à démontrer que la prédominance de l'un ou l'autre métal tenait surtout à la façon dont le départ métallifère s'était effectué à partir de la roche ignée qui en était le point de départ plus ou moins immédiat et comment, par suite, le groupe métallifère était particulièrement déterminé par la profondeur de cristallisation originelle. En plan horizontal comme en coupe verticale, les métaux se modifient dans les mêmes systèmes de gisements à mesure que l'on s'éloigne des magmas granitiques et forment, par exemple, en plan, des auréoles concentriques, où l'on voit apparaître successivement étain, cuivre, zinc, plomb et mercure ¹.

Cette idée première nous a amené à diverses conséquences.

En premier lieu, elle nous a conduit à penser qu'un type de métallisation était représentatif d'une certaine disposition tectonique; d'où l'idée nouvelle des types régionaux métallifères et des provinces métallogéniques ². En second lieu, nous en avons conclu théoriquement et nous avons vérifié par l'examen chimique qu'un simple échantillon de minerai peut être lui-même représentatif de son groupe et, par exemple, qu'une blende renferme toujours des traces de substances étrangères diverses, absolument caractéristiques du milieu où elle a cristallisé ³. On retrouve ainsi, dans l'ensemble comme dans le détail, l'idée d'association, remplaçant celle, autrefois classique, de venues individuelles.

L'étude de ces associations nous a permis ensuite de classer les métaux par groupes correspondants à leur profondeur moyenne de cristallisation et de déterminer ainsi géologiquement une liste des métaux auxquels nous attribuons une profondeur originelle de plus en plus grande. On constate ainsi cette loi remarquable que le classement primitif des atomes paraît s'être opéré dans l'ordre de leurs poids atomiques ⁴.

Dans le même ordre d'idées, nous avons pu, en étudiant également ces associations des corps simples entre eux, associations qui résultent évidemment de leurs propriétés chimiques les plus essentielles, établir une classification métallogénique des corps simples qui, sur beaucoup de points, est conforme à celle des chimistes, mais qui, sur d'autres, met en relief des analogies ou des différences nouvelles ⁵.

Pratiquement, nous avons, toujours par la même méthode, déterminé

¹ Tome I, chapitre XIII, p. 241 à 253.

² Tome I, chapitre XIII.

³ Tome I, p. 457 à 462.

⁴ Tome I, chapitre I, p. 12.

⁵ Tome I, chapitre II, p. 34.

les groupements de métaux que l'on peut s'attendre à trouver dans tel ou tel type de gisements. Nous avons, par exemple, établi avec précision les lois qui permettent de savoir d'avance si un gisement ferrugineux sera ou non phosphoreux, arsenical, ¹ etc., les règles de la concentration du titane, etc.

2° Modifications ultérieures des gisements métallifères. — On avait autrefois une tendance à admettre que les gisements métallifères se présentaient généralement à nous dans les conditions de leur dépôt primitif, en restreignant les modifications ultérieures au cas très localisé des « chapeaux de fer » sur les filons pyriteux ou à quelques faibles modifications semblables. Nous avons insisté, au contraire, sur la très grande importance des *remises en mouvement*, qui peuvent descendre, suivant les pays, jusqu'à des profondeurs de 200 ou 300 m. au-dessous de la surface ². Les gites métallifères ont été, depuis leur cristallisation primitive, constamment soumis au contact très prolongé d'eaux souterraines chargées d'acide carbonique, de chlorures, nitrates, sulfates, etc. ; et, soit à l'état de solutions, soit à l'état de colloïdes, les corps les plus insolubles en apparence ont été ainsi soumis à des déplacements dont on a sans cesse la preuve manifeste. Cette idée nous a permis d'expliquer toute une série de phénomènes d'une très grande importance pratique : limitation constante en profondeur des kaolins, alunites, phosphorites, oxydes de manganèse, barytines, etc. ; zones d'enrichissement des filons de cuivre, d'argent, ou d'or, auxquelles succèdent en profondeur des zones pauvres, etc.

Nous verrons, par exemple, comment il y a tendance constante à l'exsudation, au départ dans le sens de la superficie et, par suite, à la concentration vers la surface, pour bien des métaux donnant des produits oxydés, tels que le manganèse, le cobalt, le zinc, l'uranium. Il y a, au contraire, tendance à la descente dans le plan du filon et à l'enrichissement vers la limite inférieure de la zone altérée pour le cuivre, l'argent ou l'or, avec développement, pour les deux premiers métaux, de sels antimonieux ou arsenicaux.

En combinant ces deux notions de la profondeur de cristallisation primitive et de l'altération ultérieure, on peut apporter une utile contribution au problème capital que les praticiens posent aux théoriciens de la géologie : à savoir les modifications qu'ils doivent attendre en profondeur sur un gisement dont la partie haute est seule connue.

¹ Tome II, p. 293.

² Tome I, chapitre x, p. 179 à 207.

GITES MINÉRAUX ET MÉTALLIFÈRES

PREMIÈRE PARTIE

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE MÉTALLOGÉNIE

CHAPITRE PREMIER

PROBLÈMES PRÉLIMINAIRES DE LA MÉTALLOGÉNIE

I. OBJET DE LA MÉTALLOGÉNIE. PRINCIPALES ÉTAPES DE LA CONCENTRATION MÉTALLOGÉNIQUE. — II. STRUCTURE COMPARÉE DE LA TERRE ET DES ASTRES. — III. NOTIONS SUR LES PARTIES INTERNES DE LA TERRE. — IV. LA DISTRIBUTION PRIMITIVE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES. — V. LEUR PROPORTION MOYENNE.

I. OBJET DE LA MÉTALLOGÉNIE. ORDRE ADOPTÉ DANS SON ÉTUDE

La métallogénie étudie les gisements minéraux des éléments chimiques, leurs groupements et, spécialement, les concentrations anormales qui nous les présentent sous une forme industriellement supérieure à la moyenne et, par conséquent, utilisable. On peut la considérer comme un cas particulier, le plus intéressant, de la pétrographie. Obéissant à cette tendance générale de notre esprit qui ne se contente pas de constater, mais veut encore comprendre, elle se propose de rechercher l'origine première de ces éléments et les phases successives de l'évolution qui les a amenés dans leurs gisements actuels, afin de déterminer les lois suivant lesquelles ces gisements doivent apparaître de préférence dans telle ou telle zone géologique, présenter telle ou telle disposition, telles ou telles modifications en profondeur, etc.

A cet égard, remarquons aussitôt, sauf à paraître étendre d'abord nos vues bien ambitieusement, combien notre rayon d'investigation pratique doit nous sembler limité et combien sont spéciales les conditions dans lesquelles se présentent à nous les quelques gisements sur lesquels se fondent toutes nos spéculations théoriques. De la Terre, nous ne connaissons qu'une croûte, une écorce superficielle très mince de quelques kilomètres à peine, où, naturellement, ne peuvent se présenter à nous que les conditions de gisement propres à la superficie d'une telle planète. Nous sommes même amenés à supposer que, dès une époque pour nous très ancienne, largement antérieure à toute manifestation de vie, donc à toute possibilité actuelle de chronologie, les parties vraiment internes ont été privées de communication avec la surface et que celle-ci a eu

seulement l'écho d'une zone encore relativement mince, ayant pu avoir par exemple 100 kilomètres d'épaisseur.

Toutefois, il est peut-être permis de remédier, dans une certaine mesure, à ces ignorances forcées. Notre petite Terre est solidaire d'autres astres dont les liens avec elle sont étudiés par l'astronomie et avec lesquels il est probable qu'elle a dû ne faire qu'un dans des périodes primitives¹. Ce qui se passe dans ceux-ci, si nous le connaissions mieux, pourrait nous instruire sur certains points de la métallogénie terrestre, nous faire connaître ce qu'a été ou ce que sera un jour la Terre, nous éclairer un peu sur la constitution de zones situées à des distances différentes du centre, plus écartées ou plus rapprochées. Or, nous avons, en effet, quelques moyens d'aborder la chimie, la métallogénie de ces astres, à la condition de nous borner encore exclusivement à leur enveloppe périphérique. Mais cette restriction est absolue. Nous ne pouvons nulle part dans le monde étudier directement autre chose que les états de la matière réalisés ou transportés dans la zone extérieure d'un astre et, lorsqu'il s'agit de concevoir ce qui peut exister dans l'intérieur de ces globes plus ou moins volumineux, nous sommes forcés de procéder par induction.

D'autre part, il est de toute évidence que l'état actuel du système solaire, et spécialement celui de notre Terre, est un état momentané, amené par les phases antérieures comme il prépare des phases futures. Il y a évolution continue de sa constitution. Les théories de pur actualisme, qui ont été de mode à diverses époques de la géologie, sont particulièrement insoutenables quand il s'agit d'étudier une métallurgie compliquée, dont le point de départ originel remonte, sans doute, à la période où la Terre était encore fluide et dont les manifestations ont dû, longtemps au moins, dépendre des restes ou des retours de fluidité que les zones internes pouvaient, par endroits, présenter encore. C'est, comme nous venons de l'indiquer, un ordre d'idées où l'astronomie peut nous apporter son secours. Nous ne craignons donc pas, dans ce premier chapitre, d'envisager des questions délicates, dont les géologues abandonnent volontiers une partie aux astronomes et aux physiciens, sauf à nous renfermer ensuite dans le cercle plus restreint, où nous aurons, pour nos observations, un champ plus précis et plus sûr.

Si nous envisageons dès lors, tout à fait dans leur ensemble, les problèmes posés par la métallogénie, nous pourrons, en nous bornant aux très grandes lignes, examiner aussitôt sur quels points principaux devra porter notre attention.

1° Distribution primitive des éléments dans la période cosmique. — Quand nous cherchons nos minéraux ou nos minerais dans leurs gisements naturels, nous les trouvons dans une certaine confusion apparente, dont nous allons précisément ici nous efforcer de reconstituer les lois d'abord inaperçues. Nous verrons vite que certaines opérations de la

¹ On s'est demandé si la dissymétrie terrestre ne tiendrait pas à la façon dont se sont produites les séparations, soit entre le Soleil et la Terre, soit entre la Terre et la Lune. Voir, sur ces questions, 1914, POINCARÉ. *Hypothèses cosmogoniques*.

métallurgie naturelle, produites par les réactions ignées, ont pour résultat de combiner plusieurs éléments entre eux et d'établir progressivement de grandes masses à composition plus homogène, tandis que d'autres, provoquées par des réactions aqueuses, tendent plutôt à séparer ces éléments les uns des autres et à rassembler tous ceux d'une même nature, ou du moins tous ceux qui jouissent d'une propriété commune, en des points d'élection favorables. Dans l'histoire de la Terre, ces réactions ignées et aqueuses ont exercé successivement leur effet sur les mêmes substances et se sont tour à tour annihilées. Ce que nous observons, c'est la résultante d'une série d'opérations semblables, et l'on peut aussitôt en conclure que, dans la formation relativement récente des concentrations anormales, industriellement utilisables par leurs facilités d'extraction plus grandes, le rôle des réactions aqueuses a dû prédominer, puisqu'elles ont pour effet de classer par catégories, suivant leur degré de solubilité dans divers réactifs, les éléments auparavant disjoints. Mais, si nous remontons plus loin, jusqu'à la période cosmique de la Terre et jusqu'aux premières étapes de sa consolidation, nous sommes amenés à supposer qu'alors, dans des conditions de métallurgie ignée toutes spéciales, où les éléments chimiques étaient tous à l'état de vapeurs, ceux-ci, libres alors de leurs combinaisons réciproques, devaient obéir à d'autres lois de classement plus générales, où ce qui constitue aujourd'hui pour nous le poids atomique était la principale force en jeu. Nous allons revenir bientôt sur cette considération, par laquelle nous aurons à commencer notre étude. Il a dû y avoir, au début, une sorte de classification ignée, qui a porté vers la périphérie certaines formes de la matière : celles que nous trouvons par suite avec une abondance spéciale, dans toutes les zones superficielles accessibles à nos observations, soit sur la Terre, soit sur les autres astres. Au contraire, d'autres éléments se sont trouvés alors condensés dans les parties internes, d'où ils n'ont pu être apportés à la périphérie que par des circonstances locales et exceptionnelles, à l'étude desquelles nous apporterons tout notre effort. Il en résulte, pour nous, leur rareté, qui contribue, dans une forte mesure, à leur prix. C'est à ce groupe interne qu'appartiennent surtout les métaux.

Quand on examine la surface d'un astre en ignition, tel qu'a dû être la Terre à l'origine, tel qu'est aujourd'hui le Soleil, on aperçoit, dans son enveloppe extérieure, des mouvements tourbillonnaires, par suite desquels certaines parties profondes se trouvent momentanément mises à nu et, de ces parties internes, des jets de vapeurs montent jusqu'à la surface. Il est, comme point de départ, permis d'imaginer que, dans l'histoire primitive de la Terre, il s'est produit, sous une forme ou sous une autre, quelque chose de semblable et que de là résultent, originairement, des concentrations tout à fait exceptionnelles de certains métaux rares, l'or, le platine, le mercure, etc., dont on trouve, rassemblés dans un espace de quelques kilomètres carrés, une quantité égale ou supérieure à celle que peuvent renfermer ailleurs des pays entiers. Quelle que soit la forme sous laquelle ces métaux nous apparaissent aujourd'hui, quels que soient les agents intervenus ultérieurement dans leur localisation sous sa forme actuelle, des gisements comme ceux de l'Oural pour le platine, de Witwatersrand pour l'or, d'Almaden pour le mercure, du lac Supérieur

pour le cuivre, de la zone des Détroits pour l'étain, impliquent, à un moment donné, une concentration tout à fait exceptionnelle de métaux, dont l'origine première a dû être interne.

Sans doute, il a pu et dû se produire là ultérieurement un concours de circonstances exceptionnelles, qui a mieux concentré qu'ailleurs des traces métalliques tout d'abord disséminées. Ces métaux ont pu alors être repris dans la fusion des roches, ou dégagés dans leurs fumerolles. Ils ont pu se dissoudre dans les eaux chaudes ou froides et cristalliser sous des influences précipitantes. Il a pu même intervenir des préparations mécaniques analogues à celles de nos usines. On n'en échappe pas moins difficilement à cette conclusion que des fusions ignées, des vaporisations, des circulations hydrothermales, des sécrétions latérales, des altérations superficielles, des remaniements détritiques analogues et combinés à peu près de même entre eux, se sont produits en beaucoup d'autres points sur la surface de la Terre et qu'ils n'y ont pourtant pas constitué les mêmes gisements riches, apparemment parce qu'ils ne trouvaient pas déjà rassemblés et prêts à être concentrés à peu près superficiellement en quantité pareille les mêmes éléments profonds.

Les points où certaines catégories de roches, dont les exemplaires stériles sont ailleurs abondamment représentés, se sont trouvés contenir exceptionnellement des provisions si extraordinaires de métaux rares, ont dû offrir très anciennement quelque chose de spécial, et nous sommes logiquement autorisés à chercher d'abord ce quelque chose (d'autant plus spécial que la concentration métallique envisagée a été plus rare) dans les premières phases de la consolidation planétaire, ou tout au moins dans les périodes où les parties internes de la Terre avaient encore, avec la superficie, des communications qui ont disparu depuis.

2° Concentration déterminée par les actions éruptives. — Cependant il existe, d'autre part (et c'est à quoi nous passerons ensuite), un fait d'observation très net : à savoir la relation d'origine qui, d'une façon générale, rattache les gites métallifères aux roches éruptives et qui, plus particulièrement, relie tel métal à telle roche. On a pu discuter sur la manière dont ce métal s'est séparé de la roche mère, sur l'époque où a eu lieu cette séparation : les uns rattachant le phénomène à la période ignée et à une volatilisation de fumerolles, les autres supposant un simple lessivage aqueux des roches par les eaux, auquel on a donné le nom de sécrétion latérale. Sur le fait en lui-même, il ne saurait guère y avoir de désaccord. L'origine des premières concentrations métallifères, auxquelles nous donnerons le nom d'inclusions, de ségrégations, etc., est un effet direct de la métallurgie ignée, qui a, en même temps, déterminé, suivant la nature du magma originel et suivant les conditions de sa cristallisation, les divers types de roches : un métal utilisable étant presque toujours associé au même type de roche ignée. Ainsi, pour préciser par deux exemples opposés, nous trouverons l'étain habituellement lié aux roches acides et alcalines du groupe des granulites, le platine associé aux roches basiques et magnésiennes du groupe des péridotites.

Cela ne veut pas dire que toutes les granulites renferment de l'étain et, lorsqu'elles en contiennent, qu'elles aient pu toutes donner lieu à des gise-

ments d'égale importance. Ce serait contraire à l'observation précédente. Il ne faut pas entendre non plus par là que de l'étain ne puisse pas exceptionnellement s'associer à d'autres types de roches. Mais cela signifie que, lorsque le bain interne renfermait en un point de l'étain (ce qui peut avoir eu lieu assez souvent), celui-ci avait une tendance à se concentrer dans les portions de la scorie qui prenaient la forme de granulites, tandis que le platine allait dans celles qui constituent les péridotites.

Plus l'élément considéré était un élément banal et abondamment représenté dans les parties superficielles de l'écorce terrestre, plus les points où une telle concentration a pu se produire sont nombreux. Ils sont rares, au contraire, et d'autant mieux caractérisés pour les métaux, tels que le platine, le mercure, l'or, etc., auxquels nous sommes conduits à attribuer une origine plus profonde. Nous sommes donc, par cette seconde observation, amenés à faire intervenir de suite un second phénomène essentiel pour la métallogénie: la réaction de métallurgie ignée qui n'a pu, bien entendu, avoir lieu que lorsque la première condition, à savoir la présence du métal en abondance spéciale, s'était déjà trouvée réalisée, mais qui, alors, a accentué cette concentration en rassemblant ce métal dans des roches d'une structure propice à sa cristallisation, ou en déterminant sa volatilisation par l'intermédiaire de métalloïdes qui accroissent sa mobilité.

3° Intervention des eaux chaudes profondes. — C'est alors que nous devons, en troisième lieu, invoquer, comme un agent tout à fait essentiel, la circulation des eaux chaudes profondes et émanées, pour la plus grande partie, elles-mêmes des roches éruptives. L'observation montre, en effet, la localisation d'un très grand nombre de minerais dans des fentes, des fissures, des filons, où tout concourt à démontrer l'action des eaux thermales.

4° Remaniements superficiels. — Enfin, sur ces minerais divers, de concentration ignée ou hydrothermale, nous verrons, avec non moins d'évidence, que les réactions superficielles, liées à l'action chimique, puis mécanique, des eaux qui circulent au voisinage de la superficie ou sur cette superficie même et qui vont se condenser dans certains bassins de sédimentation, a été généralement considérable.

Résumé. Distinction de quatre étapes essentielles dans la concentration métallogénique. — Les quatre grandes étapes des opérations métallogéniques, qui nous apparaissent ainsi dès le premier examen, seront donc : 1° localisation première des éléments dans la période de volatilisation et de fusion primitive ; 2° réactions ignées de la pétrographie et ségrégations ; 3° circulations hydrothermales ; 4° modifications ultérieures des gisements par les altérations superficielles, les remaniements détritiques et les sédimentations. La fin de ce chapitre sera consacrée au premier ordre de questions qui constitue un champ d'études théorique très spécial et presque indépendant de la recherche pratique des gisements. Puis, après avoir exposé et discuté au chapitre II la classification métallogénique des corps simples qui justifie l'ordre adopté plus tard dans nos descriptions de détail, nous aborderons les trois autres étapes de la métallogénie en partant

de l'origine première attribuée par nous aux métaux pour examiner leur concentration ultérieure suivant l'ordre logique où elle nous paraît s'être réalisée.

Dans d'autres théories, auxquelles nous ferons ultérieurement plus d'une allusion, on néglige une ou plusieurs des quatre phases nécessaires que nous croirons devoir, au contraire, considérer. Les actualistes se bornent volontiers à la dernière phase, dont les effets ont souvent tellement masqué et défiguré les phénomènes antérieurs qu'au premier examen on les voit seuls. Des théories, qui remontent aux origines mêmes de la géologie¹, ont réduit toute la métallogénie à un lessivage superficiel et récent des faibles traces métalliques, à notre avis résiduelles, que peuvent contenir les roches ignées. Les filons métallifères auraient été alors formés par en haut, *per descensum* et se limiteraient tous au voisinage de la surface. D'autres théories ont, au contraire, presque exclusivement considéré le rôle des phénomènes hydrothermaux, négligeant aussi bien l'intervention des ségrégations ignées que celle des altérations superficielles. Ailleurs, on a eu une tendance inverse à généraliser ces réactions de voie ignée, ces différenciations comparables à de pures liquations, pour laisser de côté, ou du moins restreindre au minimum les opérations de voie aqueuse et ce que nous appellerons les pneumatolyses. Enfin le lien qui peut rattacher la métallogénie à l'astronomie et à la physique du globe a été très généralement passé sous silence.

Nous estimons, pour notre part, qu'une interprétation satisfaisante de tant de phénomènes complexes exige ces quatre ordres différents de considérations ; et, plutôt que d'en diminuer le nombre, nous admettrions volontiers qu'il faudra en invoquer plus tard d'autres encore, auxquels nous n'avons pas pensé et dont le rôle, pour le moment, nous échappe.

II. STRUCTURE COMPARÉE DE LA TERRE ET DES ASTRES

J'ai insisté tout à l'heure sur l'impossibilité où nous sommes de connaître la Terre autrement que par son écorce superficielle. On peut ajouter que, par l'observation directe et en laissant de côté les hypothèses très justifiées de la géologie, nous abordons seulement l'état actuel de cette Terre, qui représente une phase très momentanée de son histoire. Il en serait autrement si nous pouvions promener notre curiosité à travers l'espace pour y examiner les autres astres, dans lesquels il est infiniment probable que l'on trouve à l'instant présent des représentants de toutes les formes prises par un astre en ignition au cours de sa consolidation successive : de toutes les formes en particulier qu'a pu prendre la Terre. Ce qui, dans le temps, s'est succédé en un même point, nous pourrions, en un même temps, le retrouver en divers points de l'espace. C'est le très grand intérêt que peuvent offrir aux géologues les progrès de l'astrono-

¹ Je renvoie, pour tout l'historique et la discussion des théories, à mon ouvrage sur *la Science géologique*, où plusieurs chapitres sont consacrés à la métallogénie. Ici il est inutile d'entrer dans des polémiques oiseuses et, toutes les fois que la vérité paraît bien assise, il suffit de l'exposer, réservant les discussions pour les cas où le doute peut encore subsister entre diverses théories contraires.

mie physique. Sans doute nous avons déjà fait remarquer que partout la zone extérieure seule nous apparaît ; nous sommes condamnés, pour tous les corps célestes, à ne connaître jusqu'à nouvel ordre que la surface. Mais ce serait pourtant beaucoup que de pouvoir multiplier les observations de ce genre, comme l'analyse spectrale, et l'examen spectrohéliographique commencent à nous en donner le moyen. Peut-être ne sera-t-il pas inutile de rappeler en deux mots ce que la métallogénie est fondée à en conclure¹.

Le premier fait, très général, qui frappe d'abord dans l'examen des corps célestes, c'est leur sphéricité. On remarque ensuite un aplatissement ordinaire des pôles avec une concentration de matière à l'équateur, dont les anneaux de Saturne sont la forme la plus manifeste. Il est difficile de ne pas en conclure l'idée d'une fluidité première qui a été, en effet, admise par tous à peu près sans conteste et que nous retiendrons, comme un fait presque démontré, quand nous reviendrons à l'étude de la Terre. Nous allons retrouver, dans le détail, l'influence de la rotation autour d'un axe, qui tend généralement à déterminer une disposition zonée en zones parallèles à l'équateur, aussi bien sur le Soleil et sur Mars que sur les plus anciennes cartes paléogéographiques de la Terre.

Un autre fait intéressant, c'est la tendance qui se manifeste, pour tous les éléments de poids atomique léger, à s'écarter vers les zones périphériques. Nous assistons, partout où l'état de volatilité le permet, à une classification approximative des éléments dans l'ordre de leurs poids atomiques, dont la conséquence est que les astres s'appauvrissent peu à peu en éléments légers, toujours en fuite vers l'espace. C'est pourquoi de petits astres morts comme la Lune, ont perdu depuis longtemps presque totalement leur enveloppe de principes volatils et de vapeur d'eau ; c'est pourquoi une fuite semblable doit se produire sur la Terre, qui s'appauvrit progressivement en hydrogène, envolé dans les espaces interplanétaires² et, par suite, en vapeur d'eau, dont cet hydrogène, soustrait à ses combinaisons possibles avec l'oxygène, était sans doute le résidu.

Envisageons en premier lieu le *Soleil*, qui est le représentant le plus accessible pour nous de l'état igné. Un des résultats les plus importants de son étude est qu'il y a là, suivant toute apparence, une masse pâteuse interne formant un noyau obscur dont la température, d'après les dernières mesures, ne dépasserait peut-être pas 3 500° ou 4 000° et, tout autour, une enveloppe lumineuse de vapeurs incandescentes, soumises à des mouvements tourbillonnaires, avec développement de champs magnétiques³. La première zone incandescente, celle de la photosphère, paraît formée surtout de fer, puis de magnésium, de nickel, de calcium, d'aluminium, de sodium, d'hydrogène, d'hélium, de traces de manganèse, cobalt, titane, chrome et étain, enfin de quelques corps non identifiés. Les protubérances, ou flocculi de la chromosphère comprennent des tourbillons d'hydrogène,

¹ Voir la *Science Géologique*, p. 118 à 124, 656, etc.—1911. L. DE LAUNAY. *La géologie des corps célestes* (*La Nature*, 11 nov.).

² La haute atmosphère terrestre paraît s'enrichir progressivement, d'abord en azote, puis en hydrogène (*La Nature*, 23 oct. 1911).

³ On a pu, par le phénomène de Zeeman, déceler, dans ces tourbillons, des intensités magnétiques de 4.500 gauss.

de l'hélium, peut-être de l'argon, des nuages incandescents de vapeurs de calcium flottant à plusieurs milliers de kilomètres de hauteur et quelques-uns des métaux précédents, sodium, magnésium, etc.

Dans ces conditions d'ignition, on est conduit à penser que toute cohésion doit être détruite et que la gravitation doit jouer un rôle inférieur à celui de la force répulsive qui accompagne la radiation lumineuse.

D'autre part, le rayonnement extérieur, qui refroidit la surface et qui y provoque peut-être des condensations et des combinaisons chimiques, détermine des circulations verticales, par suite desquelles, en des zones limitées, se produisent des apports du centre à la périphérie, des éruptions de vapeurs métalliques centrales, qui doivent nécessairement rendre l'enveloppe extérieure hétérogène. La localisation des taches solaires suivant des bandes très limitées des deux côtés de l'équateur peut en être la conséquence. Le Soleil accuse déjà cette disposition zonée par bandes équatoriales qui est, dans l'histoire ancienne de la Terre, le trait le plus saillant, le plus persistant, malgré toutes les déformations dissymétriques produites dans la suite par les transformations internes, les plissements et les effondrements.

Supposons maintenant que le Soleil vienne à se solidifier extérieurement, comme cela a eu lieu pour la Terre et comme il est probable que cela se produira un jour pour lui, puisque la conservation de son énergie calorifique constitue un paradoxe mécanique dont on est réduit à chercher l'explication dans l'intervention du radium. Nous aurons alors une croûte ferro-magnésienne et calcaire, dans laquelle on ne reconnaît guère les trois éléments essentiels de l'écorce terrestre, le silicium, l'aluminium et l'oxygène¹, peut-être volatilisés dans la photosphère sans y être discernables, mais où on retrouve le magnésium et le nickel comme dans nos roches profondes. Cette écorce sera grossièrement distribuée par zones parallèles à l'équateur et présentera, en certains points d'élection, des concentrations métalliques assimilables à des sortes de bouffées. Au-dessus il existera, avec tendance probable à la condensation, une atmosphère d'hydrogène, d'hélium et de combinaisons diverses entre les métaux alcalins, le calcium, le magnésium et les métalloïdes.

On voit aussitôt l'intérêt que peut offrir cette comparaison avec la Terre. Elle fait cependant ressortir avec celle-ci deux différences apparentes, utiles à mettre en relief : tout d'abord la présence sur le Soleil d'un certain nombre de corps non identifiés sur la Terre, dont la proportion diminue il est vrai chaque jour ; ensuite la différence de composition que l'enveloppe solaire semblerait devoir présenter avec l'enveloppe terrestre. Malgré tout le désir instinctif que nous pouvons avoir d'imaginer l'unité première de l'univers cosmique, on est en droit de supposer qu'avant la séparation des parties qui ont formé les divers éléments du système solaire, s'il existait déjà l'équivalent de notre matière actuelle, ces éléments ont pu se diviser inégalement entre les divers astres, un peu comme nous imaginions tout à l'heure une localisation originelle de métaux en

¹ Le rôle de l'oxygène dans le Soleil reste douteux, les raies d'origine tellurique venant s'interposer.

certain points de la Terre. L'étonnant n'est pas qu'il y ait, entre la constitution chimique de la Terre et celle du Soleil, quelques différences peut-être seulement apparentes, c'est beaucoup plutôt qu'il apparaisse aussitôt entre elles tant de ressemblances et que notre Terre minuscule nous fournisse, comme dans un musée, des échantillons de la plupart des éléments chimiques existant dans l'univers.

Si on étend ses investigations à d'autres soleils plus lointains, on retrouve quelque chose d'analogue. Ainsi, dans une étoile temporaire de la constellation du Cygne, on a pu expliquer l'état momentané par l'inflammation subite d'un tourbillon d'hydrogène, analogue à ceux qui se produisent à la surface du Soleil et, à côté de cet hydrogène, on a reconnu l'hélium, le magnésium, le sodium, etc.

De même pour *les comètes*. Quand on a, par exemple, en 1910, étudié la comète de Halley, on y a constaté que la tête était surtout formée de cyanogène et d'hydrocarbures, tandis que la queue présente, avec quelques hydrocarbures, une proportion dominante d'oxyde de carbone. Les raies du sodium ont été également bien caractérisées.

Passons maintenant aux planètes. Ici l'analyse chimique ne sera plus applicable, mais nous aurons à comparer la structure produite par le refroidissement avec celle de la Terre.

Cette étude a été surtout faite pour la *Lune*¹. Dans l'examen de notre satellite, ce qui frappe aussitôt, c'est la grande quantité de cirques à arêtes plus ou moins vives et, d'une façon plus générale, c'est la forme circulaire de la plupart des contours, où cependant certains accidents rectilignes sont à noter, comme la Grande Vallée, le mur droit, le réseau d'accidents orthogonaux autour de Herschel et Arzachel, etc. Il est impossible, en voyant cette surface criblée de pustules, de ne pas songer à la solidification d'une croûte de scorie traversée par des sortes d'immenses bulles gazeuses qui viennent éclater au dehors² et, si cette idée n'a pas été plus généralement admise du premier coup, c'est qu'on est parti de l'idée préconçue qu'il n'avait jamais existé ni air ni eau à la surface de la Lune. On arrive, au contraire, à s'imaginer une croûte mince se solidifiant par la juxtaposition de compartiments polygonaux³, puis se plissant par l'effet de la contraction interne, des intumescences volcaniques suivies d'affaissements, des projections de cendres et des épanchements, l'augmentation progressive d'épaisseur de la croûte amenant, comme sur la Terre, la localisation de plus en plus accentuée des dislocations, enfin l'atténuation de la pesanteur permettant la disparition complète des prin-

¹ 1908. PUISEUX. *La Terre et la Lune* (Gauthier-Villars). — 1909. CH. ANDRÉ. *Les planètes et leur origine* (Gauthier-Villars). — 1914. SIEGMUND GÜNTHER. *Vergleichende Mond und Erdkunde* (Braunschweig). — 1911. POINCARÉ. *Hypothèses cosmogoniques*.

² Une théorie bien bizarre de T. J. J. SEE. (*Res. on the Evol. of the stellar Systems*) voudrait voir, dans les cratères lunaires, les empreintes d'un bombardement produit à la surface de la Lune par des chutes d'astéroïdes. Pour lord Kelvin, les parties, d'abord solidifiées à la surface du bain de scorie, seraient tombées vers le centre qui se serait consolidé avant l'écorce superficielle.

³ On a, pour reproduire l'aspect de la Lune, reproduit une vieille expérience de Chancourtois, qui laissait se dégonfler un ballon recouvert de cire et déterminait ainsi un premier réseau de rides dessinant grossièrement des polygones à quatre, cinq ou six côtés.

cipes légers dans l'espace. L'absence de condensation aqueuse abondante au-dessus de cette croûte et celle de toute sédimentation résultante ont laissé la structure ignée partout visible et supprimé le modelé extérieur qui est, au contraire, la caractéristique de la superficie terrestre.

Il est probable, par comparaison, que la proportion des silico-aluminates doit prédominer : la silice partant d'un minimum dans le Soleil pour arriver ici à un maximum en passant par la Terre. L'action de la Lune sur le magnétisme laisse supposer que ces silicates, comme ceux des parties profondes de la Terre, doivent être fortement ferrugineux. De curieuses expériences sur les rayons infra-rouges ont montré également que la réflexion lumineuse se faisait, sur les roches lunaires, comme sur nos laves terrestres.

La faible densité moyenne de la Lune, égale aux deux tiers de celle de la Terre (3,38), montre, d'autre part, qu'avec un diamètre quatre fois plus petit, cette croûte silicatée s'y étend jusqu'à une proximité plus grande du centre que sur la Terre et qu'elle y réduit le noyau métallique interne dont nous supposons l'existence sur celle-ci.

Enfin la conservation d'un appareil volcanique extérieur et l'absence d'érosion font présumer que les phénomènes métallogéniques dont la surface de la Lune pourrait offrir des exemples, doivent y appartenir au groupe de ceux que nous supposons eux-mêmes, sur la Terre, avoir été formés dans des conditions superficielles. Comme ces apparences volcaniques nécessitent un dégagement de principes volatils, si momentanément qu'il ait pu être celui-ci, on admettrait volontiers qu'il a pu s'y produire un apport métallique vers la superficie, analogue à celui que nous trouvons habituellement dans les grands champs volcaniques et la zone métallogénique terrestre, à laquelle la Lune pourrait nous faire penser, si l'hypothèse n'effrayait par sa hardiesse, est celle du Mexique.

Mars, sur lequel on discute tant, a des chances pour être beaucoup plus analogue à la Terre et à la Lune qu'on ne l'estime d'ordinaire. Il est bien probable que l'illusion de ses fins canaux mobiles est créée par des traînées de taches que l'œil fatigué et suggestionné de l'observateur groupe plus ou moins arbitrairement et que sa structure réelle se borne à quelques grandes zones marines, comme pourraient en donner notre Méditerranée ou notre Atlantique : zones dont la principale (dite Sinus Sabeus, M. Sirenum, Mare Cimmerium, etc.) forme, en effet, une traînée équatoriale assimilable à notre Méditerranée. Vers le Sud, il est frappant, sur les derniers planisphères¹, de voir les compartiments antarctiques présenter la même torsion tous dans le même sens (Arabia, Chryse) que ceux de la Terre, tandis qu'au Nord apparaissent, comme sur la Terre également, un certain nombre de taches continentales, placées à la suite les unes des autres et séparées par des sillons méridiens. Il semble donc que la structure de Mars ait, comme celle de la Terre, subi, postérieurement à sa consolidation première, le jeu des plissements, des éclatements et des sédimentations. On constate d'ailleurs, autour de Mars, une atmosphère avec de la vapeur d'eau².

¹ Voir *La Nature*, 19 mars 1910, p. 245 et 17 juin 1911.

² D'après des travaux récents, l'atmosphère de Mars contient beaucoup moins d'oxygène et d'eau que celle de la Terre (*La Nature*, 1^{er} juillet 1911).

Les autres planètes nous sont trop peu connues physiquement pour pouvoir raisonner sur elles. En ce qui concerne Vénus et Mercure, Poynting et Lowell ont calculé que, la température moyenne extérieure de la Terre étant de 16° et celle de Mars de 9° , celle de Vénus devait être de 66° , celle de Mercure de 193° . On a retrouvé, sur Vénus, les taches polaires brillantes attribuables à des banquises qui sont une des caractéristiques de Mars et une atmosphère très chargée de vapeur d'eau. Sur Mercure, la lumière solaire se reflète dans des conditions qui rappellent la Lune.

De Saturne, nous n'avons à retenir qu'un fait, c'est l'existence des anneaux formés, suivant toute vraisemblance, de particules matérielles solides discontinues, séparées par des intervalles très grands relativement à leurs dimensions : autrement dit, d'innombrables satellites décrivant chacun leur orbite.

III. NOTIONS SUR LES PARTIES INTERNES DE LA TERRE

Nous avons fait remarquer dès le début, à quel point est mince la croûte terrestre sur laquelle peuvent porter nos observations directes. Il est vrai, que l'on arrive d'autre part, à la conclusion que, dans les phénomènes géologiques, à peine quelques myriamètres de cette écorce ont dû intervenir : les phénomènes extérieurs, qui nous frappent par leur amplitude, ayant tous leur origine à une faible profondeur. Mais, s'il en résulte pour nous la possibilité de raisonner avec quelques vraisemblances sur les faits qui constituent à proprement parler l'histoire géologique sans avoir à nous occuper de ces zones trop profondes, il n'en est plus de même lorsqu'on ose aborder, comme nous le faisons dans ce premier chapitre, la distribution première des éléments matériels, cause initiale de toutes les concentrations métallogéniques futures. Nous devons donc examiner encore si les autres sciences ne nous fournissent pas quelques notions sur ces parties internes de la Terre, que nous sommes incapables d'aborder. Je me contenterai de résumer à ce propos ce qu'il peut y avoir de plus intéressant pour notre sujet spécial dans un travail que j'ai donné ailleurs¹.

Le premier point capital est la détermination de la *densité terrestre*. On sait que la valeur de cette densité, désormais bien acquise par des méthodes diverses, est de 5,50, tandis que l'écorce superficielle varie entre 2 et 3 pour les roches et 1 pour l'eau. Il semble donc de toute évidence que le noyau interne présente une densité très supérieure à celle de la superficie : ce qui concorde bien avec une observation précédente sur la fuite inverse des éléments légers vers l'espace et nous fait aussitôt concevoir l'idée, sur laquelle nous insisterons dans un paragraphe suivant, d'une première distribution générale des atomes d'après leur densité. Les éléments lourds, qui sont les métaux, ont dû tendre à se concentrer vers le centre à un moment où la volatilité générale le permettait ; et, lorsque nous trouvons ces métaux à la surface dans des points rares où se sont constitués précisément nos gisements métallifères, c'est qu'une cause accidentelle, dont nous avons déjà cherché à concevoir une idée, a déterminé un dégagement local de vapeurs métalliques vers la surface.

¹ *La Science géologique*, chap. IV.

Un second point important et bien connu est l'*augmentation de température* en profondeur, du moins dans les limites restreintes où nous opérons. Cette augmentation de température se produit lentement dans les régions que la géologie nous fait connaître comme les plus anciennement consolidées de la planète ; elle est, au contraire, très prompte dans les zones où se manifestent encore des phénomènes éruptifs ; sa moyenne est, on le sait, d'environ un degré par 30 mètres. Dans les conditions normales, la température de 2 000 degrés nécessaire à la fusion des roches serait réalisée vers 71 kilomètres de profondeur ; elle l'est beaucoup plus tôt dans les régions volcaniques, où le degré géothermique est plus faible. Ces variations de température doivent se faire d'autant plus lentement qu'on s'éloigne de la source froide pour gagner le centre. En tout cas, à partir d'une profondeur de 100 kilomètres au plus, les phénomènes prennent des formes qui échappent actuellement à notre physique et dont l'influence en géologie paraît être devenue insignifiante. Une conséquence classique de cette diminution de température est une perte de calories vers l'espace. Quelle que soit donc l'origine de cette température interne, conservation de calories anciennement emmagasinées ou, comme on l'a récemment supposé, intervention du radium, il n'y en a pas moins déperdition constante et, par conséquent, refroidissement progressif, entraînant la contraction terrestre avec toutes ses conséquences.

En troisième lieu, les *phénomènes magnétiques*, qui nous apportent le contre-coup des modifications du champ magnétique solaire, devraient, en même temps, si on savait mieux les interpréter, nous renseigner sur la répartition de la matière interne, à laquelle il faut évidemment attribuer leurs anomalies permanentes locales. Tout au moins semble-t-il en résulter l'existence interne d'un noyau ferrugineux profond, orienté à peu près dans le sens de l'axe terrestre et recouvert d'une croûte de scorie, plus épaisse à l'équateur qu'aux pôles.

IV. DISTRIBUTION PRIMITIVE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

Exposé du problème.— Nous pouvons maintenant aborder un problème extrêmement obscur qui domine toute la métallogénie prise à son origine, celui de la distribution primitive des éléments : distribution, dont les modifications accidentelles et locales ont déterminé des concentrations que cet ouvrage a pour but essentiel d'étudier. Si tous les éléments étaient restés répartis par zones à peu près régulières et homogènes comme on peut supposer qu'ils l'ont été dans une période primitive, zones que diverses considérations nous ont déjà amené à supposer concentriques, on trouverait, dans chacune d'elles, les éléments qui lui sont propres répartis partout en même proportion, tandis qu'ils seraient absents dans les autres et il n'y aurait pas à proprement parler de ces concentrations anormales qui sont nos gisements métallifères.

On sait assez que l'état réel est tout différent. Mais, dans une faible mesure, il subsiste un certain reste de cette disposition antérieure et nous constatons aisément, dès les premières observations, que notre écorce terrestre superficielle avec son enveloppe d'atmosphère doit correspondre,

dans toute son étendue, à une même zone déterminée de la masse en ignition primitive : zone, où certains éléments caractéristiques sont répartis presque uniformément de tous côtés, dans des conditions d'abondance et de banalité telles qu'il ne saurait être question pour eux à proprement parler d'un gisement. C'est le cas pour les éléments légers qui forment les couches extérieures de l'atmosphère : l'hydrogène parti vers la périphérie lointaine, puis l'azote et l'oxygène. C'est également le cas pour les éléments normaux, essentiels, de la scorie silicatée, qui sont, avant tout, le silicium et l'aluminium, puis le magnésium et les métaux alcalins ou alcalino-terreux. Les autres corps, dont la recherche forme précisément l'objet de nos mines, ne sont que des accidents dans cette écorce superficielle. Ils ne s'y trouvent pas à leur place. Ils y représentent, par suite d'une circonstance exceptionnelle, un état de choses intérieur, une zone plus profonde, dans laquelle, si nous pouvions pénétrer, nous les trouverions sans doute dominants, comme, à la surface, dominant l'aluminium et le silicium.

Partir des apparences désordonnées que présente actuellement le monde minéral pour essayer de reconstituer son ordre primitif, tel est le problème que nous nous posons dans ce chapitre. Il s'agit de prendre à rebours les suites de phénomènes qui ont amené les métaux dans leurs gisements actuels afin de remonter progressivement à leur point de départ. Pour le faire, nous devons nous appuyer sur toute une série de notions métallogéniques qui pourront, résumées ici sous une forme tout à fait succincte, présenter d'abord quelque obscurité au lecteur, mais qui seront ultérieurement exposées et démontrées dans le cours de cet ouvrage¹. C'est ainsi que nous invoquerons les associations des métaux dans leurs gisements et le mode de formation qui en résulte pour leur ensemble, afin d'en conclure la place originelle plus ou moins profonde qu'il est logique d'attribuer à ces éléments chimiques dans la distribution primitive.

La loi qui va en résulter et que j'ai déjà eu l'occasion d'exposer ailleurs différemment², établit une relation entre le poids atomique d'un élément quelconque et la position occupée par lui dans la Terre encore en ignition : un élément ayant été alors, selon nous, d'autant plus rapproché du centre que son atome est plus lourd. Elle explique donc l'abondance de certains éléments et la rareté de certains autres par leur position, ou plus proche, ou plus éloignée de la périphérie : les exceptions, dont nous aurons à faire tout spécialement l'étude plus tard, étant le résultat de bouffées métalliques, de dégagements volatils dans les mouvements tourbillonnaires, d'emprisonnements anciens dans la scorie, de montées hydrothermales, etc. Elle montre aussi un rapport, qui n'est pas sans intérêt, entre les affinités chimiques des éléments, la densité de leurs atomes, leur position initiale, leur rareté et leur prix. Outre la valeur théorique qu'elle peut présenter, la démonstration de cette loi nous sera ensuite utile pour établir, au cha-

¹ On en trouvera l'exposé méthodique dans les chapitres IV à XIII. Les exemples justificatifs des règles alors énoncées seront donnés en détail quand nous étudierons chaque corps en particulier.

² La *Science géologique*, ch. xv, p. 627. Je me contente d'énoncer ici certaines conclusions qui ont été discutées dans ce travail.

pitre suivant, la classification métallogénique des éléments chimiques, qui nous imposera, dans tout le reste du livre, l'ordre de nos descriptions.

Place à attribuer aux éléments. — Quand on aborde ce problème de la distribution primitive, on en voit aussitôt les difficultés presque inextricables. Car, depuis le commencement de l'évolution terrestre, il n'est pas un des éléments considérés qui soit demeuré à la place initiale, où nous nous proposons de le replacer, qui n'ait certainement passé par des cycles compliqués, ramené successivement de la profondeur à la périphérie, de la périphérie à la profondeur par des réactions contradictoires opérées à des températures diverses. Mais on peut d'abord tenter de concevoir logiquement ce qui a pu se produire dans la condensation de la masse primitivement volatile, puis examiner ce que l'observation directe nous apporte d'enseignements intéressants à ce sujet.

Si nous procédons ainsi, nous devons d'abord penser qu'au début les éléments légers ont dû être entraînés vers l'espace, s'y refroidir assez pour que leurs condensations et leurs combinaisons devinssent possibles, se rapprocher alors du centre et s'y dissocier de nouveau. Quand les combinaisons chimiques se sont produites, elles ont dû associer et mêler les éléments des zones voisines, et cela d'autant plus que ces éléments pouvaient se trouver chimiquement ou électriquement complémentaires. Puis, toujours dans cette première phase, des dégagements de vapeurs ont dû entraîner localement certains des éléments internes à travers les couches supérieures vers la périphérie. Une fois la consolidation de l'écorce effectuée et un certain ordre réalisé, des montées internes ont dû encore se produire à travers des fissures et, peu à peu, des éléments profonds ont dû s'élever vers le haut, tandis que les principes gazeux arrivés à l'atmosphère tendaient à s'y classer, les plus légers s'écartant de plus en plus, les plus denses restant à la base et que des combinaisons devenues liquides pouvaient être reprécipitées par la gravité.

D'une façon générale, et en laissant de côté les brassages, les tourbillons, les mélanges locaux, la tendance générale a été sans doute celle d'un départ vers l'extérieur, provoqué par la force centrifuge quand elle était supérieure à la pesanteur et, en outre, par l'activité du foyer interne; mais il a pu y avoir également des retours par la gravité vers le centre, surtout à mesure que le refroidissement a amené la condensation. Nous ne pouvons donc pas prendre pour règle que la place originelle d'un élément soit partout au point le plus rapproché du centre où nous en constatons la présence, quoi qu'en moyenne on paraisse être en droit de l'admettre.

En fait, trois groupes distincts de manifestations terrestres nous offrent la presque totalité des éléments chimiques : 1° les eaux, 2° l'écorce silicatée et 3° les fumerolles d'origine interne, auxquelles nous attribuerons les filons métallifères. Ces trois groupes appartiennent cependant, selon toute apparence, à trois zones primitivement distinctes et superposées. Entre elles il y a quelque arbitraire à choisir une place plutôt qu'une autre comme caractéristique d'un élément, et c'est pourquoi nous n'arriverons pas à des certitudes. Dans cette indécision, nous considérerons tout à l'heure comme la place naturelle d'un élément, celle où il se présente avec une abondance particulière et où il tend à revenir quand il n'est retenu, ni

par une combinaison, ni par un obstacle matériel, comme l'interposition de la croûte terrestre empêchant la chute des éléments lourds vers la zone centrale.

Par exemple, des éléments légers, dont la place naturelle serait au dehors de l'écorce, peuvent se rencontrer également au dedans emprisonnés ou combinés depuis l'origine : l'hydrogène, l'oxygène, l'azote par exemple ; mais ils tendent à en sortir et à s'en écarter de plus en plus, comme les composés instables dans des conditions données tendent vers une forme d'équilibre plus stable.

D'autre part, nous trouvons, en grande abondance, un certain nombre de métalloïdes, comme le chlore, le soufre ou le bore, dans les eaux de la mer. Mais il faut voir comment ils y sont arrivés. Leur origine est au moins dans les roches cristallines ignées, dont ils ont pu se dégager par deux voies : ou bien par dissolution directe à la surface, ou bien, plus profondément, par une refusion qui a mis en liberté des fumerolles volcaniques et minéralisé ainsi des eaux filoniennes. D'une façon ou d'une autre, ces éléments solubles finissent toujours par aboutir dans les eaux de la mer. Mais leur origine réelle paraît plus profonde, puisque nous voyons constamment l'intérieur de la Terre en fournir sans en recevoir, si ce n'est d'une façon insignifiante par quelques refusions possibles de sédiments.

Une autre remarque est à faire en ce qui concerne la proportion des divers éléments chimiques. Il n'y a aucune raison pour que tous les éléments existent quelque part en même quantité et soient seulement distingués par la place qu'ils occupent. Le contraire est infiniment plus vraisemblable, sinon certain et nous en aurons un commencement de preuve en ce qui concerne les gaz inertes ou encore les corps d'une même famille chimique, dont la zone originelle a dû être la même, mais dont la quantité est extrêmement différente là où on les rencontre réunis. Nous reviendrons sur cette question en étudiant bientôt la proportion moyenne des éléments chimiques dans l'écorce silicatée. Il en résulte que la rareté d'un corps dans une zone déterminée n'est nullement une preuve que sa place originelle soit ailleurs, si nous ne constatons pas d'autre part, ou si nous ne pouvons pas rationnellement supposer qu'il est ailleurs en plus grande abondance.

A côté de ces difficultés que nous devons signaler de suite, il est cependant un certain nombre de faits très simples, presque évidents, qui nous permettent d'établir notre théorie et qui en demeureront le fondement solide. Ce sont ceux, par lesquels nous allons commencer, qui s'appliquent aux zones hautes, périphériques (atmosphère, écorce silicatée et substratum tout à fait immédiat), pour lesquelles notre examen est, soit direct, soit à peine compliqué d'hypothèse. A mesure que nous nous efforcerons de pénétrer plus profondément par la pensée dans des régions internes qui nous sont inabordables, nos raisonnements deviendront plus critiquables et leur argument le meilleur sera encore une raison de continuité. Partant ainsi de la périphérie pour gagner le centre, nous chercherons à établir, par la métallogénie et la géologie, une liste des éléments chimiques, qui peuvent être considérés comme les chefs de files, les types des familles complexes. Cette liste une fois établie, il suffira de la comparer avec une liste établie tout à fait indépendamment d'après

l'ordre des poids atomiques pour que leur concordance nous serve de démonstration.

Éléments de l'atmosphère. — En partant donc de la périphérie pour gagner le centre, une foule de considérations nous amènent à placer dans une zone tout à fait externe l'hydrogène et peut-être l'hélium. Nous assistons à une fuite continuelle de ces deux éléments légers vers l'espace et nous pouvons admettre que la terre s'appauvrit sans cesse en l'un et en l'autre, la perte en hélium étant seule compensée par sa production continue aux dépens d'autres corps, en sorte qu'on imaginerait volontiers notre planète traînant derrière elle dans l'espace, comme les comètes, une sorte de queue hydrogénée. Une curieuse théorie de Wegener, fondée sur les réfractions sonores dans la haute atmosphère, sur les spectres des traînées lumineuses laissées par les étoiles filantes, etc., tendrait à montrer que l'hydrogène domine entre 80 et 220 km., faisant place plus bas à une zone d'azote, puis à la basse atmosphère, où l'hydrogène, en dehors de sa combinaison en eau, n'apparaît plus qu'à l'état de traces¹. D'autre part, les phénomènes volcaniques amènent sans cesse au jour un peu d'hydrogène résiduel qui n'est pas entièrement recombinaé et la Terre dégage également de l'hélium.

Nous possédons, à cet égard, des éléments de comparaison utiles dans le Soleil et dans les étoiles. Sur le Soleil, ce sont des tourbillons d'hydrogène incandescents qui contribuent pour une forte part aux protubérances de la chromosphère. Sur les étoiles, nous trouvons d'autant plus d'hydrogène qu'elles sont plus brillantes et, par conséquent, plus chaudes² : hydrogène associé à de petites quantités de vapeurs métalliques. Au contraire, dans une étoile à température moins élevée comme notre Soleil, dont par suite, l'évolution est plus avancée, et dont les vapeurs légères ont eu le temps de gagner l'espace, cet hydrogène est dans la photosphère en quantités moindres par rapport à toute une série d'autres corps que nous avons eu l'occasion d'énumérer. Enfin, dans la tête des comètes, on retrouve cet hydrogène combiné avec le carbone.

Au-dessous de la haute atmosphère que nous supposons hydrogénée, l'atmosphère inférieure contiguë à la Terre renferme ses trois principaux éléments bien connus : l'azote avec les gaz inertes de la même famille, l'oxygène et l'acide carbonique. L'azote y domine de beaucoup, surtout quand on s'élève. Il en forme les quatre cinquièmes en poids. On le retrouve sous la forme de cyanogène dans l'atmosphère cosmique, au milieu de laquelle semble flotter la poussière de silicates basiques et de métaux natifs qui constitue sans doute les comètes. Sa place originelle n'est donc guère douteuse. L'azote, en raison de son inertie, a échappé mieux que

¹ Voir un résumé de la question dans *La Nature* du 23 octobre 1911. L'hélium se dégage en grandes quantités dans le grisou des mines (MOUREU. CR., 30 oct. 1911).

² Sir Norman Lockyer s'était même fondé sur cette observation pour se demander si, dans les parties très chaudes des étoiles, des dissociations en train de s'opérer n'empêchent pas l'existence des corps simples, métaux et métalloïdes, que nous rencontrons sur la Terre. Ces corps, dans son idée, auraient eu une tendance à se produire dans la périphérie plus froide, mais, ramenés vers le centre par leur condensation en atomes métalliques, s'y détruiraient au fur et à mesure. Cette théorie a été chimiquement combattue par Berthelot.

tout autre corps aux combinaisons et est demeuré à sa place originelle. Certaines de ses parties n'ont cependant pas échappé à un emprisonnement dans la scorie. On constate directement l'azote en inclusions dans certains minéraux. On le retrouve en chlorhydrate d'ammoniaque ou en acide nitrique dans les fumerolles volcaniques.

On peut en dire autant des autres gaz inertes, l'argon, le krypton, le xénon, le néon, etc. Ces gaz ont leur place naturelle dans l'atmosphère, et le peu qui s'en est trouvé emprisonné dans les parties internes tend sans cesse à s'en dégager dans les sources thermales, les fumerolles, etc.

On a même attiré l'attention sur ce fait intéressant que le rapport du krypton à l'argon paraissait être constant dans l'atmosphère, dans les gaz spontanés des sources, dans les gaz volcaniques¹ : rapport égal en volume à 6.10.⁻⁶. Le rapport de l'argon à l'azote est lui-même à peu près constant. Il semble donc que, pour ces éléments, échappés par leur inertie au désordre que les combinaisons ont introduit dans les autres, la place originelle soit demeurée avec la proportion primitive.

Le cas de l'oxygène est à peu près aussi net, quoiqu'ici les combinaisons faciles de ce corps avec les éléments des deux zones voisines, d'une part à l'extérieur avec l'hydrogène, d'autre part, à l'intérieur avec le silicium, l'aluminium et les métaux de la zone scoriacée, qui constituent la croûte, aient amené quelques complications. En dehors de son abondance dans l'air, l'oxygène est un élément très important de l'écorce silicatée, dont il forme en poids à peu près la moitié. Au-dessus de cette écorce il entre pour 86 p. 100 dans la composition des mers. Néanmoins sa place originelle est évidemment dans l'atmosphère. Il est, en effet, très nettement établi par toute la métallogénie que l'oxygène est, dans l'écorce silicatée, un élément superficiel, arrivé par le dehors et dont la proportion diminue quand on s'enfonce, pour disparaître enfin, selon toutes vraisemblances, à moins de 100 kilomètres de la surface.

Assurément cette disparition n'est jamais complète dans les scories silicatées qui constituent nos roches ignées, même dans les plus profondes que nous puissions atteindre; mais elle s'annonce déjà dans les magmas basiques qui ont toutes chances pour être des magmas particulièrement profonds; elle atteint son maximum dans certaines météorites que nous assimilons volontiers à des fragments d'une zone interne projetés au dehors avant la solidification complète de la Terre. Enfin l'étude de tous les gîtes métallifères sulfurés démontrera que l'oxygène y est un produit adventif et qu'à l'origine les fumerolles profondes, par lesquelles ont été incrustés ces filons, en étaient exemptes. De même, il y a des chances pour que l'eau, par laquelle se réalise l'association de l'oxygène et de l'hydrogène, cesse à une assez faible profondeur dans la Terre, avec la scorie silicatée dans laquelle elle s'est trouvée englobée au moment de la consolidation et d'où elle tend incessamment à se dégager par les fumerolles volcaniques, les sources thermales des régions éruptives, etc. sans qu'il paraisse y avoir nulle part retour réellement profond.

Nous considérons donc comme à peu près certain que l'oxygène a occupé, au début, une place intermédiaire entre le groupe des éléments

¹ CH. MOUREU et AD. LEPAPE (C. R., 27 mars 1911).

de la scorie que nous allons examiner tout à l'heure et le groupe plus léger de l'hydrogène, un peu au-dessous de l'azote. Mais, tandis que l'azote restait inerte, l'oxygène se combinait avec les deux groupes d'éléments voisins, constituant l'écorce silicatée avec les eaux qui se sont précipitées sur elles ; et cette combinaison de l'oxygène peut être considérée comme le fait essentiel, dont est résultée ensuite toute l'histoire géologique, puisqu'elle a entraîné, à la surface, toutes les sédimentations et même, en profondeur, les dégagements d'eau volcanique.

L'atmosphère nous a offert un troisième élément, le *carbone*. La place originelle de celui-ci est beaucoup plus douleuse. Le carbone externe n'est pas à l'état libre : il existe combiné à l'hydrogène, ou à l'oxygène. Avec l'oxygène il forme l'acide carbonique que sa densité ramène vers la Terre et dont la proportion dans la basse atmosphère doit de ce chef paraître exagérée. En outre, ce carbone est l'élément fondamental de la vie organisée, dont la place est évidemment localisée à la superficie et celle-ci l'y entraîne dans des cycles indéfinis, parmi lesquels il ne faut pas oublier celui, si important en géologie, qui le fixe dans les roches calcaires et qui, de ces calcaires, peut, par absorption, par endomorphose, le réintroduire dans les roches ignées. Il y a donc bien des raisons pour placer le carbone originel dans la même zone approximative que l'oxygène, où il aurait été comburé par sa combinaison avec lui.

On peut ajouter que la présence du carbone en cyanogène ou en oxyde de carbone joue un grand rôle dans la composition des comètes et que les hydrocarbures sont abondants dans les queues des comètes en milieu non oxydé : par conséquent, dans des conditions périphériques.

D'autre part, une certaine proportion de carbone existe en profondeur et il ne nous paraît nullement exact d'admettre, comme on l'a parfois soutenu, que tout ce carbone interne ait commencé par traverser les formes de la vie. Il y a tout au moins dégagement du carbone depuis longtemps emprisonné dans l'écorce, où il entre en moyenne pour près de 0,2 p. 100 : dégagement sous la forme des hydrocarbures que l'on rencontre dans les fumerolles et qui ont joué, nous le verrons, un rôle de minéralisateurs dans les phénomènes filoniens. On sait également que certaines météorites, dont nous venons déjà de rappeler l'assimilation avec des matériaux de profondeur, contiennent du carbone.

La place du carbone demeure donc discutable. Les faits ne sont, en tout cas, nullement contradictoires avec notre loi qui le placerait ici côte à côte avec l'oxygène.

Eaux et organismes. — Au-dessous de l'atmosphère nous devons maintenant considérer les mers, les eaux et les organismes vivants de la superficie terrestre. J'ai déjà dit que la mer nous offrait, avec le produit dominant de la combinaison entre les deux principes externes, hydrogène et oxygène, une accumulation de tous les principes chimiques passés à l'état soluble qui ont pu à un moment donné exister à la superficie. Je l'ai appelée ailleurs l'égoût universel. On y trouve la liste à peu près complète de tous les éléments chimiques ; mais le phénomène extérieur, par lequel ils ont été amenés là, est, en général, trop manifeste pour qu'il faille y attacher de l'importance pour notre sujet.

Seuls, les chlorures et les sulfates qui y dominent pourraient prêter à discussion. On pourrait se demander si ces éléments ne se sont pas, au moment de la scorification, condensés dans une zone externe pour être immédiatement entraînés dans le ruissellement produit par la condensation connexe de la vapeur d'eau. Comme nous allons le dire bientôt, il est plus probable que le chlore et le soufre ont été, comme les autres principes de la mer, empruntés au lessivage des roches et que leur teneur s'y accroît progressivement par la continuation de semblables apports, jointe à des possibilités de diminution pour le volume total des mers.

Quant aux matériaux des êtres vivants, si intéressants pour nous à d'autres égards et déjà signalés plus haut à l'occasion du carbone, ils ne constituent qu'une pellicule imperceptible, immédiatement puisée dans le substratum et dans l'enveloppe de ces organismes, dans les éléments les plus abondants ou les plus facilement assimilables situés à leur contact et qui, tous plus ou moins, arrivent à s'y introduire en proportion de leur solubilité.

Éléments de l'écorce silicatée. — Nous arrivons ainsi à l'écorce terrestre, formée de nos roches éruptives et des sédiments empruntés à leur remaniement : écorce qui englobe tous les matériaux solides dont nous disposons et dans laquelle nous allons chercher, à l'exception de ceux que nous fournit l'air, tous les éléments de notre chimie. C'est assez dire que cette écorce est complexe et nous donnerons bientôt son analyse moyenne qui précisera cette complexité. Néanmoins, l'analyse moyenne accuse, en même temps, de la façon la plus nette, sa nature très spéciale, qui est celle d'une scorie silicatée à base surtout alumineuse, dans laquelle l'oxygène entre pour moitié, le silicium pour un quart, l'aluminium pour un dixième et dont le reste est presque entièrement formé de fer, de calcium, de magnésium et d'alcalis. La comparaison avec ce qui se passe dans nos usines métallurgiques, conduit immédiatement à voir là une écume solidifiée à la surface d'un bain de fusion, dans lequel dominaient plus bas les métaux qui ont fourni les bases nécessaires à la saturation de l'acide silicique. Cette scorie est d'autant plus légère qu'elle contient plus d'oxygène et de silicium : ce qui la rend, en même temps plus difficilement fusible, et plus prompte à se solidifier. L'accroissement des autres métaux, au contraire, la rend plus dense et plus liquide. Les conditions diverses de composition et de structure dans lesquelles a pu cristalliser cette scorie forment la base de toute notre pétrographie et de toute la partie de la métallogénie qui étudie ce que nous appellerons les ségrégations ignées. Ces deux sciences nous montrent que certains éléments préexistaient dans la scorie supérieure, que d'autres ont cristallisé plus profondément et ne nous sont connus que là où l'érosion les a mis à jour en décapant leur couvercle, que d'autres enfin sont montés par des fissures qualifiées de filons. C'est la base d'une classification qui permet d'attribuer aux uns et aux autres, malgré leur confusion apparente, une origine plus ou moins profonde.

Mais un fait domine tout par sa netteté, c'est que l'écorce terrestre est formée par la combinaison du silicium et de l'aluminium, du sodium et du magnésium, auxquels peuvent s'ajouter le calcium, le fer, etc., avec l'oxygène de l'enveloppe extérieure.

Ce premier fait fondamental, qui est immédiatement prouvé par toutes les analyses de roches, se retrouve sous une autre forme dans une application ingénieuse que l'on a pu faire de ces analyses.

Rosenbusch a fait cette remarque que ce qu'il a appelé le nombre moléculaire de toutes les roches était constant, en définissant nombre moléculaire d'un élément chimique quelconque sa teneur pour cent divisée par son poids moléculaire ($30/60 = 0,50$, pour 30 p. 100 de silice, à poids moléculaire 60) et faisant l'addition. Si on multiplie chacun des nombres obtenus par cent pour éviter les décimales, on trouve ainsi toujours 150, quelle que soit la roche analysée; et le nombre est encore plus constant (183) si, au lieu des oxydes, l'on envisage, en négligeant l'oxygène adventif, les seuls atomes métalliques qui ont dû constituer la forme primitive et profonde du magma. La scorification s'est donc faite dans des conditions d'homogénéité telles, malgré toutes les différences apparentes, qu'il entre toujours le même nombre d'atomes métalliques dans un même poids de roche. Si la proportion de certains atomes lourds comme le potassium se trouve forcée, des atomes légers comme le magnésium viennent établir la compensation.

Autrement dit, puisque le même nombre de molécules prises en un point quelconque de ce magma pesait le même poids, la diffusion de ces molécules a eu lieu dans des conditions telles que le poids moléculaire moyen était constant et égal à $10.000/150$, ou 66,66, soit à peu près la moyenne entre la silice et l'oxyde ferreux (60 et 72). L'oxygène entrant pour 47 p. 100 dans les roches, on peut encore dire que le poids atomique moyen des métaux dans la zone qui s'est scorifiée, était de $(100-47) \times 100/183$, ou 28,9: c'est-à-dire, à très peu près le poids du silicium (28,4). Nous voyons ainsi que la zone de la scorie silicatée a bien pour caractéristique le silicium. Les autres éléments, qui se sont associés par diffusion au silicium pour se combiner à lui, se sont groupés de manière à prendre le même poids atomique moyen, et c'est sur tout cet ensemble que s'est exercée l'influence oxydante de l'oxygène plus superficiel.

L'homogénéité, qui résulte de là pour l'ensemble des roches ignées, peut d'abord sembler surprenante si l'on pense à toute les variétés que la pétrographie a réussi à établir entre elles. Mais il est facile de voir que ces différences entre ces roches si variées se réduisent à peu de chose. Au contraire, dans une région déterminée, on constate souvent l'existence d'une parenté chimique entre toutes les roches représentées. C'est, sous une autre forme, l'application de ces localisations par bouffées régionales que nous supposons originellement (ou du moins très anciennement) en plus petit pour les métaux plus rares. En outre, quand on envisage un grand massif d'une roche consolidée à l'abri du trouble introduit par la superficie, d'un granite par exemple, c'est un fait bien remarquable, quoique l'habitude nous le fasse sembler naturel, que l'identité d'une telle roche renfermant, sur des kilomètres cubes, partout les mêmes éléments minéralogiques dans la même proportion et avec la même composition élémentaire.

Nous considérons donc, comme éléments typiques de la scorie superficielle, ceux que nous venons d'énumérer, éléments auxquels viennent s'en ajouter beaucoup d'autres que nous aurons l'occasion de citer plus

tard : notamment, avec le sodium ou le calcium, les autres métaux alcalins ou alcalino terreux, puis le zirconium, le glucinium, le groupe du thorium, du cérium, du lanthane, etc.

Minéralisateurs. — Cette scorie silicatée est, en outre, d'autant plus riche en métalloïdes volatils qu'elle est plus acide et plus légère. Dans les roches acides, la présence du fluor, du chlore, du phosphore, du bore, se décèle de tous côtés par les cristallisations de minéraux où ces métalloïdes subsistent, et par celles de corps où il est manifeste, notamment par nos synthèses, qu'ils sont intervenus.

Ces métalloïdes, chlore, soufre, phosphore, bore, se trouvent, de plus, déjà abondamment dans les eaux de la mer. Enfin, ils arrivent constamment au jour dans les fumerolles volcaniques et l'analyse reconnaît, en effet, comme nous venons de le dire, leur présence dans la plupart des roches ignées, dont la fusion profonde a pu, à elle seule, donner ces fumerolles. Mais, surtout, on est conduit à leur assigner un rôle spécial dans les filons métallifères, où ces éléments électropositifs aptes à mobiliser les métaux ont été appelés les *minéralisateurs*. C'est ce rôle dont il convient de dire un mot pour préciser la place de ce groupe dans la série.

Tout d'abord il faut s'entendre sur ce qu'on entend par minéralisateurs.

Les métaux proprement dits, qui prennent une part prépondérante dans nos filons sont, pour la plupart, incapables de se dégager, de se déplacer isolément, à moins d'avoir été volatilisés à des températures qui ne semblent pas s'être fréquemment réalisées dans les zones de l'écorce terrestre, où se sont introduites nos roches ignées, qui, en tout cas, sont très loin d'avoir été atteintes dans les cristallisations filoniennes, opérées en principe à basse température, au-dessous de 300 ou 400 degrés. La combinaison avec les minéralisateurs augmente leur volatilité et ensuite leur solubilité. On peut admettre que, dans les magmas profonds, des traces métalliques sont restées disséminées depuis l'origine. Quand ces roches ont été ramenées à l'état de fusion, les minéralisateurs présents se sont emparés de ces métaux, les ont entraînés et, finalement les ont déposés dans les fissures diverses de l'écorce, dont les filons sont la forme la plus connue.

Tandis que les métaux ont besoin des métalloïdes pour se déplacer, les métalloïdes, ou seuls, ou combinés deux à deux, sont suffisamment mobiles; ils peuvent, en outre, se combiner aux métaux légers de la scorie silicatée supérieure sous forme de chlorures volatils.

Où se trouve donc la place essentielle de ces minéralisateurs? Logiquement elle doit être au-dessous de la scorie silicatée normale, à travers laquelle on voit partout se manifester un dégagement des métalloïdes. Mais il semble qu'elle soit au-dessus des métaux de ségrégation, auxquels nous allons passer : groupe dans lequel son rôle devient très restreint, tandis que, si les minéralisateurs avaient dû s'élever vers la surface à travers une zone profonde de chrome, nickel, manganèse, etc., on trouverait le soufre, le fluor, etc., aussi abondants dans ces ségrégations basiques profondes qu'ils ont dû l'être dans les scories silicatées acides, où leur intervention apparaît à chaque pas.

Ségrégations basiques de profondeur. — Au-dessus de ces minéralisateurs, nous n'avons rencontré que les métaux très spéciaux du groupe alcalin ou alcalino-terreux. Au-dessous commence, au contraire, avec le groupe fer, manganèse, chrome, vanadium, titane, le bain métallique proprement dit.

C'est la zone de ce que nous appellerons les *ségrégations ignées* des roches basiques. Ces ségrégations sont les produits d'une liquation qui, au sens strict du mot, a dû s'opérer en vase clos, sans intervention d'éléments volatils et où l'oxygène, en particulier, a été insuffisant pour produire l'oxydation complète, mais où, néanmoins, en pratique, on est souvent conduit à admettre une certaine intervention de ces éléments volatils : intervention d'autant plus naturelle que les déplacements successifs des roches dans l'écorce ont amené constamment entre elles des contacts et des superpositions anormales.

Toute cette zone des *ségrégations basiques* est très homogène. Le fer y domine de beaucoup, surtout sous la forme de magnétites; on rencontre, en même temps, les fers chromés, les titano-magnétites, les silicates de manganèse : toute une série de métaux, voisins les uns des autres par toutes leurs propriétés, voisins aussi par leurs poids atomiques et présentant ici ce caractère commun que leurs oxydes sont incomplets (protoxydes ou oxydes salins). Le titane y est particulièrement abondant, bien qu'il présente, d'autre part, des caractères métallogéniques qui nous le feront rapprocher de l'étain. Le vanadium, que nous comparerons au phosphore, s'y rencontre également (comme le phosphore lui-même) dans les minerais de fer.

On pourrait encore y ajouter le platine que nous ne connaissons pas autrement. Mais le cas du platine est très spécial. Ce métal, faute d'affinités chimiques, n'a pu, dans aucun cas, s'élever jusqu'au jour, en sorte qu'il nous est exclusivement connu là où, par un accident très ancien, la scorie silicatée s'est trouvée en englober de faibles traces, qui y sont restées comme un résidu dans un fond de creuset. A l'exception du platine, tous ces métaux se trouvent également dans les filons, mais beaucoup plus rarement que dans les ségrégations basiques.

Gîtes de départ immédiat. — Dans ces ségrégations ignées, on commence à voir apparaître des métaux, qui sont cependant, avant tout, des éléments filoniens, analogues à ceux que nous examinerons ensuite : le *nickel* et le *cuivre*. Tous deux se montrent déjà dans les ségrégations, souvent associés au soufre : par suite, dans des conditions qui se rapprochent du type filonien. On peut même remarquer que le cuivre est plutôt un métal de départ immédiat que de ségrégation proprement dite. Il existe sans doute dans des pyrrhotines, en même temps nickelifères, qui dérivent des gabbros, ou encore à l'état de chalcopyrite associée avec de la magnétite; mais il est également très fréquent dans les filons. Nous serons conduits, quand nous l'étudierons, à lui attribuer une place intermédiaire entre le groupe du fer et de ses satellites et celui des métaux sulfurés, auxquels nous allons passer. En même temps, ce caractère se décèle d'une autre manière. Le cuivre, comme le nickel, sont des éléments fréquemment constatés à l'état d'inclusions, ou de traces, dans les minéraux magnésiens des roches basiques.

Gîtes filoniens. — Nous arrivons enfin au groupe des métaux relativement rares que l'on trouve presque exclusivement dans un certain nombre de filons, où on voit qu'ils sont arrivés de la profondeur, soit à l'état de chloro-fluorures (*élaïn, tungstène*, etc.), soit en combinaisons avec: le soufre, le sélénium, le tellure, l'arsenic et l'antimoine, comme le *zinc*, l'*argent*, l'*or*, le *mercure*, le *plomb*, le *bismuth*.

Le premier caractère très net pour ces métaux est que, dans l'écorce silicatée, où cependant nous les recueillons en quelques points privilégiés, ces métaux constituent une anomalie. Aucun d'eux n'entre pour 1/1000000 dans la constitution de l'écorce et leur total n'y intervient certainement pas pour 1/100000. Caractérisés par leur forte densité, ces corps ont déjà par là des chances d'être plus abondants dans les parties internes de la Terre, puisque nous avons vu que la densité de ces zones internes était au moins le double de la densité superficielle. Là où nous les rencontrons dans les filons, nous avons, en outre, la preuve manifeste qu'ils sont arrivés d'en bas, empruntés, selon toutes vraisemblances, à une primitive concentration, accidentellement réalisée dans la scorie profonde au-dessus de quelque bouffée dégagée du bain métallique initial. Ces métaux n'apparaissent pas, ou guère, dans les ségrégations basiques. Ils viennent donc, suivant toute apparence, de plus bas encore et il a fallu, pour qu'ils s'élèvent ainsi, la présence d'une scorie légère, acide, chargée de minéralisateurs qui, en montant, les a dégagés; après quoi, dans les fractures, leurs vapeurs, mêlées à de la vapeur d'eau, se sont condensées et ces eaux thermales ont fini par cristalliser dans une zone que nous considérerons bientôt comme relativement superficielle. La rareté d'un phénomène, qui a nécessité tout ce concours de circonstances, est prouvée par le petit nombre de points qui, nous l'avons déjà remarqué, fournissent pratiquement la presque totalité de ces métaux.

Quant à établir un ordre de superposition primitive pour ces métaux que nous atteignons seulement après un long déplacement, c'est évidemment impossible. Nous remarquerons seulement que leur rareté paraît être à peu près proportionnelle à leur densité. Si (ce qui n'est certainement pas exact, mais ce qui peut nous servir de première approximation) nous supposons la réserve de chacun de ces corps identique, mais placée d'autant plus profondément qu'il est plus dense, on comprend que ses chances d'arriver à la surface se soient trouvées, en effet, inversement proportionnelles à la densité de ses atomes. C'est donc comme une simple approximation très vague, que l'on peut, par ordre d'abondance décroissante, établir les groupes suivants: 1° plomb, cuivre, zinc et étain; 2° antimoine, argent; 3° mercure, tungstène, bismuth et or; 4° uranium, platine. Il est, d'ailleurs, infiniment probable qu'au-dessous de ces corps, dont quelques indices sont montés jusqu'à nous, d'autres états de la matière, dont nous n'avons pas de notion, sont représentés dans la profondeur; et les vraisemblances sont même pour que ce noyau inconnu commence assez rapidement au-dessous de nous.

Conclusions et discussion. — En résumé, de cette étude, qui a été jusqu'ici purement géologique, ressort, avec quelque vraisemblance,

l'ordre de superposition suivant pour les principaux éléments chimiques qui constituent l'écorce terrestre :

1° Hydrogène, hélium. — *Atmosphère primitive et périphérique* :

2° Oxygène, azote (argon, krypton, néon, xénon)¹, carbone. — *Atmosphère* ;

3° Silicium, aluminium, sodium, potassium (lithium), magnésium, calcium (baryum, strontium, glucinium). — *Écorce silicatée* ;

4° Chlore, soufre, phosphore (bore, fluor). — *Minéralisateurs* ;

5° Fer, manganèse, chrome, titane, vanadium. — *Ségrégations basiques de profondeur* ;

6° Nickel, cobalt, cuivre. — *Gites de départ immédiat et floniens reliés aux ségrégations basiques* ;

7° Zinc et plomb ; argent ; étain, molybdène, bismuth, tungstène et or ; mercure, uranium et radium. — *Gites floniens*.

Considérons maintenant une liste des éléments chimiques, classés d'après l'ordre de leurs poids atomiques, qui, on le remarquera, ne représentent pas exactement les densités des atomes, et voyons si, entre la liste géologique précédente et cette liste chimique, il existe bien la relation annoncée au début de ce paragraphe. Dans l'ensemble, cette relation apparaît aussitôt ; car on a, par ordre de poids atomiques, la série suivante² :

1° Hydrogène (1), hélium (4) ;

2° Carbone (12), azote (14), oxygène (16) ;

3° Sodium (23), magnésium (24), aluminium (27, silicium (28) ;

4° Phosphore (31), soufre (32), chlore (34) ;

5° Titane (48), vanadium (51), chrome (52), manganèse (54), fer (56).

6° Nickel et cobalt (59), cuivre (64) ;

7° Zinc (64), molybdène (96), argent (108), étain (118), tungstène (184), or (197), mercure (200), plomb (207, bismuth (208), radium (225), uranium (239).

Mais il existe des anomalies diverses, en sorte que la comparaison à établir entre les deux listes demande une courte explication. C'est ce que nous allons faire en parcourant la série complète des éléments classés par ordre de poids atomiques.

Le premier élément, que nous trouvons sur la liste, est l'hydrogène (1), qui vient également en tête de notre liste géologique.

Cet hydrogène, qui apparaît ainsi comme le corps, à la fois le plus excentrique et le plus léger du globe terrestre, ce n'est pas, rappelons-le, celui qui, actuellement, peut se présenter en traces à l'état libre dans la basse atmosphère, c'est celui des grandes altitudes, dont l'équivalent se retrouve dans les protubérances de la chromosphère solaire et dans les étoiles incandescentes.

Immédiatement après l'hydrogène, vient l'hélium (4), qui a été, en effet, découvert à la périphérie du Soleil, où il accompagne constamment l'hydrogène.

¹ Je mets entre parenthèses les éléments accessoires qui se rattachent à un élément type principal.

² Les nombres, mis ici entre parenthèses, sont les poids atomiques aux décimales près.

Je passe ensuite le lithium (7), au sujet duquel j'aurai quelques mots à dire tout à l'heure et nous arrivons maintenant au deuxième groupe des éléments atmosphériques : carbone (12), azote (14), oxygène (16), néon (20), auxquels s'associent, dans la série chimique, deux métalloïdes, que, géologiquement, nous avons préféré placer plus bas, mais qui se trouvent pourtant déjà en quantités appréciables dans les eaux de la mer : bore (11), fluor (19). Inversement, le seul élément, qui nous manque, est un corps nouveau, l'argon (39,9), dont le poids atomique est presque exactement le double de celui du néon.

Puis se présente, avec une netteté toute particulière, notre troisième groupe géologique, celui de la scorie silicatée : sodium (23) magnésium (24), aluminium (27), silicium (28).

Ici, aucun élément hétérogène n'intervient dans la liste chimique. Par contre, il nous manque : à côté du sodium, les autres métaux alcalins si analogues : le potassium (39) et le lithium (7) ; à côté du magnésium, le calcium (40), le strontium (88) et le baryum (138), qui peuvent, pour bien des raisons, représenter un autre mode de condensation des mêmes atomes.

Après le groupe de la scorie silicatée vient, également bien caractéristique, notre quatrième groupe des minéralisateurs : phosphore (31), soufre (32), chlore (35).

Le soufre et le chlore (comme son homologue, le fluor), sont les deux éléments essentiels, grâce auxquels ont cristallisé presque tous les minerais métallifères. Le phosphore, auquel on attribue moins habituellement un tel rôle, parce qu'il a donné des sels oxydés même en profondeur, intervient néanmoins d'une façon très constante dans les cristallisations des roches.

Plus loin, nous arrivons aux éléments essentiels de toutes les ségrégations basiques, c'est-à-dire aux métaux, qui, par une oxydation incomplète, se sont liquatés dans les roches les plus profondes, ou qui ont subi un départ immédiat. Là encore, le groupe est très remarquablement conforme à celui que nous avons obtenu directement par la géologie : titane (48), vanadium (51), chrome (52), manganèse (55), fer (56), nickel et cobalt (59), cuivre (64).

Le groupe des sulfures métallifères, qui constituent les filons concrétionnés, vient ensuite. Le plomb (206) s'y trouve, par son poids atomique, relégué à une place tout à fait anormale ; mais, ici, il faut bien remarquer que, dès que nous arrivons au phénomène filonien, quelque chose de tout à fait indépendant de la densité atomique et de la répartition primitive commence à intervenir, puisque le phénomène filonien a précisément consisté dans un déplacement, dans un apport vers la périphérie de métaux, qui ont pu être empruntés à des couches très inégalement profondes par l'action des mêmes minéralisateurs et qui ne se trouvent associés dans leurs gisements que par une communauté de propriétés chimiques, jusqu'à un certain point indépendante de la densité de leurs atomes. Malgré cela, il est curieux de remarquer combien la classification empirique, établie plus haut en nous basant sur l'abondance plus ou moins grande des métaux (impliquant plus ou moins de facilités pour venir à la surface, c'est-à-dire une profondeur initiale plus ou moins

grande) concorde à peu près avec l'ordre de grandeur des poids atomiques. On a, en effet, successivement : cuivre (64) et zinc (65); argent (108); étain (118), tungstène (184), bismuth (208) et or (197); mercure (200), uranium (239) et radium (225).

Il est notamment intéressant de trouver, tout au bout de la liste, comme le métal terrestre auquel nous pouvons attribuer l'origine la plus profonde, l'uranium, avec lequel sont, on le sait, associés les métaux radioactifs, qui nous apportent peut-être un témoignage accidentel des états spéciaux, que peut prendre la matière dans les parties centrales, particulièrement chaudes et comprimées de notre planète, où l'énergie lumineuse et calorifique se serait associée d'une façon instable à l'énergie intra-moléculaire, pour s'en dégager peu à peu en revenant à un équilibre plus normal.

Malgré des restrictions et des incertitudes toutes naturelles dans un sujet aussi obscur, nous arrivons donc finalement à cette conclusion, parfaitement conforme avec nos idées mécaniques, que, *dans la Terre incandescente, avant sa solidification, les éléments chimiques se sont écartés du centre en raison inverse de leur poids atomique, comme si les atomes dissociés et libres de toute combinaison chimique à de très hautes températures, avaient été uniquement et individuellement soumis à l'attraction universelle et à la force centrifuge.*

V. — PROPORTION RELATIVE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES DANS LES PARTIES SUPERFICIELLES DE LA TERRE¹

Toute l'étude qui va suivre dans cet ouvrage aura pour objet, nous l'avons annoncé, les concentrations anormales des éléments chimiques. Il est utile, pour en finir avec l'ordre des questions très générales auxquelles est consacré ce chapitre, d'examiner auparavant quelle est la proportion normale et moyenne de ces mêmes éléments dans les parties hautes de l'écorce terrestre : la comparaison avec cette teneur moyenne devant faire ressortir le caractère spécial des minerais utilisables, qui auront, en fait des teneurs absolument différentes depuis 35 p. 100 jusqu'à 1/1 000 000, suivant qu'il s'agira, par exemple, du fer ou de l'or. Cette teneur moyenne a été calculée en groupant des nombres très grands d'analyses. Elle est malheureusement très imparfaite pour ceux précisément des corps qui nous intéressent le plus par leur valeur et leur rareté. Cependant elle nous fournira souvent une première approximation.

La zone terrestre, qui est accessible à nos investigations directes, ou pour laquelle il paraît licite de prolonger sans modification appréciable des résultats constatés ailleurs, comprend trois parties distinctes : l'atmosphère, les mers et la croûte silicatée, avec ce qu'on peut trouver accidentellement, dans cette dernière, de ségrégations basiques, ou de minerais filoniens, empruntés à des zones sans doute inférieures.

Ces trois parties interviennent respectivement dans la proportion suivante :

¹ Je résume ici un chapitre de ma *Science géologique*, p. 649, où l'on trouvera les développements de cette question et sa bibliographie.

TABLEAU 1. — PROPORTION DES DIVERSES PARTIES DE L'ENVELOPPE TERRESTRE

PARTIES DIVERSES DE L'ENVELOPPE TERRESTRE	POIDS ABSOLU en millions de milliards de tonnes.	PROPORTION relative.
<i>Croûte terrestre</i> , jusqu'à 16 kilomètres au-dessous du niveau de la mer (limite conventionnelle) = 6.800 millions de kilomètres cubes, à une densité moyenne de 2,7	18.360	92,21
<i>Eau de mer</i> (21.500 millions de kilomètres cubes à une densité moyenne de 1,03)	1.545	7,76
<i>Atmosphère</i>	5,3	0,03
	19.910,3	100,00

De ces trois parties, deux sont connues chimiquement avec une approximation très grande : l'eau de mer et l'atmosphère. Pour la croûte terrestre, on a admis que la teneur moyenne calculée se maintenait jusqu'à 16 km. de profondeur.

D'après des calculs de Clarke, modifiés seulement sur deux ou trois points accessoires, on a, aux secondes décimales près, qui sont évidemment sans valeur pour la composition moyenne des roches :

Silice	39,80
Alumine	15,40
Sesquioxyde de fer	2,70
{ Protoxyde de fer (correspondant à 3,80 de sesqui- oxyde)	3,40
Chaux (correspondant à 8,55 de carbonate)	4,80
Magnésie	4,40
Soude	3,60
Potasse	2,80
Eau (dont 0,40 persistant au-dessus de 110°)	1,50
Oxyde de titane	0,50
Acide phosphorique	0,20
	<u>99,10</u>

Ou, en éléments chimiques, par ordre d'importance :

Oxygène	47,10	} 99,00
Silicium	27,90	
Aluminium	8,10	
Fer	4,70	
Calcium	3,50	
Sodium	2,70	
Magnésium	2,60	
Potassium	2,40	
Titane	0,30	
Hydrogène	0,20	
A reporter	<u>99,50</u>	

Report.	99,50
Chlore.	0,17
Carbone.	0,10
Phosphore.	0,10
Manganèse.	0,07
Soufre.	0,06
Baryum.	0,03
Fluor.	0,03
Azote.	0,02
Chrome.	0,01
Zirconium.	0,01
Nickel.	0,005
Strontium.	0,005
Lithium.	0,005
	<hr/> 99,93

Un premier résultat ressort de ces chiffres, c'est que l'oxygène, comme je l'ai déjà annoncé, forme environ la moitié de l'écorce terrestre : résultat encore plus exact quand on tient compte de l'atmosphère et des mers ; plus d'un autre quart est formé par le silicium ; il reste moins d'un quart pour tous les autres corps chimiques, dont environ 8 p. 100 d'aluminium et 5 p. 100 de fer. L'écorce terrestre est donc un silicate d'alumine, de fer, de chaux, de magnésic et d'alcalis, où entrent seulement pour environ 1 p. 100 de substances étrangères.

En nous bornant d'abord aux éléments essentiels et considérant, non plus l'écorce solide, mais l'ensemble de la superficie, composant cette écorce, avec les mers et l'atmosphère, dans les proportions données plus haut, nous trouvons :

TABLEAU 2. — PROPORTION DES ÉLÉMENTS DANS L'ENVELOPPE TERRESTRE

ÉLÉMENTS chimiques.	POIDS atomique.	ÉCORCE solide 92,20 p. 100.	MERS 7,80 p. 100.	ATMOS- PHÈRE 0,03 p. 100.	ENSEMBLE de la zone superficielle.	APPROXI- MATION probable d'après M. Clarke.
Oxygène.	16	47,10	85,80	23	50,12	± 1/20
Silicium.	28	27,90	»	»	25,72	± 1/15
Aluminium.	27,5	8,10	»	»	7,47	± 1/4
Fer.	56	4,70	»	»	4,33	± 1/3
Calcium.	40	3,50	0,05	»	3,23	
Sodium.	23	2,70	1,14	»	2,58	
Magnésium.	28	2,60	0,14	»	2,41	
Potassium.	39	2,40	0,04	»	2,21	
		99,00	87,17	23	98,07	

Parmi les éléments accessoires, dont la proportion se trouve accrue, il faut compter surtout l'hydrogène, qui, au total, n'atteint encore que 0,90 p. 100 ; accessoirement, le chlore, 0,175 ; le carbone : 0,20 ; l'azote : 0,02.

On doit surtout remarquer la très faible proportion totale de ces quatre derniers éléments, sur lesquels, à défaut de calcul, on pourrait se faire illusion, par suite de leur abondance relative dans les mers ou l'atmosphère. Même avec la correction qu'entraîne la considération de l'eau ou l'air, les huit éléments principaux, qui, dans la première partie du travail, ont été donnés comme formant l'écorce silicatée, entrent encore pour 98 p. 100 dans le total.

Envisageons maintenant les éléments secondaires, autres que les huit corps chimiques principaux, dont le total forme seulement, nous l'avons vu, 1 p. 100 de l'écorce terrestre et qui constituent néanmoins le point de départ de toute notre chimie.

Ces éléments, d'après J. Vogt, se répartissent, par ordre d'importance, environ de la façon suivante :

- 4 entre 1 et 0,1 p. 100 = Titane, hydrogène, chlore et carbone.
- 3 entre 0,1 et 0,02 p. 100 = Phosphore, manganèse, baryum, soufre, fluor. azote.
- 5 à environ 0,01 p. 100 = Chrome, nickel, zirconium, strontium, lithium.
- 7 entre 0,005 et 0,0001 = Étain, cobalt, argon, brome, iode, rubidium, arsenic, peut-être cérium, yttrium et lanthane.

En tout, il existe une trentaine d'éléments, entrant chacun pour plus de 1 milliardième dans la composition de la Terre; les quarante autres restent, pour la plupart, très loin au-dessous de cette proportion, déjà si infime.

Quelques-uns de ces éléments, parmi ceux figurant au tableau précédent, demandent des observations spéciales, lorsque la proportion qui leur est attribuée peut étonner à première vue et, surtout, il est nécessaire d'évaluer approximativement les métaux proprement dits, dont il n'a pas été question jusqu'ici. Pour ce côté de la question, le travail de J. Vogt va nous servir de base.

Si nous envisageons d'abord les métalloïdes, l'existence de l'*hydrogène* et du *carbone* dans les roches profondes a été niée et l'on a pu soutenir que, lorsqu'on les rencontrait, il y avait eu apport superficiel d'eau et d'acide carbonique. Cependant, on a beau chercher à obtenir une roche inaltérée, on n'arrive pas à la trouver exempte de ces substances¹, qui semblent, dès lors, entrer réellement dans sa composition primitive. L'action de la chaleur profonde peut alors dissocier l'eau et produire du carbure d'hydrogène avec un peu d'hydrogène libre, ainsi qu'on le constate dans le volcanisme.

Le *chlore* entre pour environ 2 p. 100 dans l'eau de mer. On estime, en outre, que sa proportion moyenne dans les roches est comprise entre 0,02 et 0,04. Le chlore des roches existe, soit en inclusions chlorurées dans le quartz, soit à l'état de minéraux chlorurés, tels que l'apatite ou les feldspaths basiques de certaines roches, ordinairement récentes, sodalite, etc.². Cette proportion ne se trouve pas sensiblement augmentée par

¹ A. GAUTIER (C. R. 1904).

² Je ne parle pas des chlorures visiblement secondaires, qui se produisent, par altération, sur les affleurements des filons de plomb, d'argent, etc.

les grands gites de sel, qui représentent, dans certains terrains, un résidu d'évaporation marine.

Nous pouvons noter, dès à présent, que la teneur en *fluor* de l'écorce est à peu près la même que celle en chlore : le premier l'emportant dans les roches acides (apatite, tourmaline, topaze, etc.) et le second dans les roches basiques ; mais, dans les eaux de la mer, la quantité de fluor est presque nulle¹, en sorte que la proportion totale de cet élément se trouve très notablement abaissée.

Le *brome* et l'*iode*, qui ne prennent place ici qu'en raison de leur présence dans l'eau de mer ou dans les produits d'évaporation salins, sont, dans l'écorce terrestre, des éléments très rares. Les minéraux où on les a signalés sont, presque tous, des substances altérées d'affleurements. Néanmoins, leurs relations chimiques avec le chlore sont si intimes qu'il paraît logique de les classer dans le même groupe géologique.

Le *phosphore* est, dans toutes les roches, un élément très constant sous la forme d'apatite. Il n'est guère de roche, qui tienne moins de 0,005 p. 100 d'acide phosphorique et souvent la teneur est beaucoup plus forte. Dans tous les cas, son origine première paraît avoir été à l'état de phosphures de fer, manganèse ou calcium, plus rarement en association avec d'autres métaux comme le plomb ou les métaux du groupe du thorium : c'est-à-dire dans des conditions analogues à celles où se présentent le soufre et les autres minéralisateurs ; mais, tandis que l'oxydation du soufre s'est faite uniquement à la surface par altération secondaire, celle du phosphore a pu avoir lieu en profondeur dans la croûte silicatée et l'y fixer toutes les fois qu'il se trouvait assez de chaux pour saturer l'acide phosphorique produit : ce qui est, on peut le dire, le cas constant. Après quoi, dans les altérations superficielles, le phosphate de chaux a suivi la fortune du fer et du manganèse en se dissolvant, comme eux, par l'intervention de l'acide carbonique et se précipitant plus loin, quand l'excès d'acide carbonique se dégagait. Les analyses de roches groupées par Clarke donnent une teneur moyenne de 0,09 ou 0,10 p. 100.

Le *soufre* est très abondant dans les roches à l'état de pyrite ou de pyrrhotine, surtout dans les roches basiques ; il forme, en outre, quelques grands gisements pyriteux, qui n'accroissent pas beaucoup sa teneur moyenne.

L'*arsenic* se rattache géologiquement au groupe du soufre et forme, comme lui, avant tout, un élément des gites métallifères, mais existe aussi, à l'état de mispickel, dans les roches au même titre que la pyrite. Sa proportion est toujours faible.

Si nous passons maintenant aux métaux de la liste précédente, pour le *manganèse*, un travail spécial de J. Vogt lui a fait trouver, comme moyenne de 232 analyses relatives à des roches acides, 0,056 de protoxyde de manganèse et, dans 141 roches basiques, 0,123. Il a admis, finalement, une moyenne de 0,075. Suivant lui, dans les roches, la proportion du manganèse au fer varie de 1 : 50^e à 1 75^e.

Le *baryum* est également presque constant dans les feldspaths des

¹ M. CARNOT (*Ann. des Mines*, 1896) a trouvé, dans l'eau de l'Atlantique, 0,00008 de fluor.

roches, bien que les analyses ne l'y signalent pas toujours. Clarke et Hillebrand ont montré, par d'innombrables analyses, la diffusion de ce corps, ainsi que celle du *strontium*. Le baryum peut aller de 0,03 à 0,04 ; le strontium approche de 0,01.

Ces deux éléments ont, nous le verrons, subi, dans les altérations superficielles, une concentration, qui en a formé de véritables gisements, à allure parfois stratifiée pour le strontium, plus souvent filonienne pour le baryum. On sait qu'ils existent très fréquemment comme gangue dans les filons métallifères. Leur origine, dans ce cas, est problématique. Souvent ils disparaissent quand on s'enfonce et doivent alors avoir été empruntés à la lixiviation superficielle des roches. Parfois ils semblent, au contraire, persister et le baryum surtout accompagne le plomb, dont le poids atomique est également très élevé, comme s'ils avaient tous deux une même origine profonde.

Le *chrome* a été évalué (peut-être un peu haut) à environ 0,01 p. 100. Il ne devient abondant que dans les roches basiques, où, comme le fait le manganèse, il tend à se substituer au fer dans un grand nombre de ses minéraux. Le groupe des péridotites renferme, en moyenne, 0,20 p. 100 de chrome ; mais, par contre, ce métal fait à peu près défaut dans les roches acides. Sa proportion paraît très analogue à celle du *nickel*, qui se présente dans les mêmes conditions, probablement un peu supérieure.

Le *zirconium* est, au contraire, un élément très habituel des roches relativement acides, où il entre à l'état d'inclusions microscopiques dans divers minéraux. Il s'est développé spécialement dans certaines syénites néphéliniques et augitiques. C'est, comme le titane et l'étain, avec lesquels il présente tant d'analogies, un métal de l'écorce silicatée, plutôt que des gîtes filoniens ; mais, comme l'étain, il va du côté acide, tandis que le titane va du côté basique.

Le *lithium* est décelé par l'analyse spectrale dans la plupart des roches, surtout des roches acides ; il y est souvent dosable. On le retrouve, avec le sodium, dans les eaux thermales, qui traversent ces roches et sa proportion, par rapport à ce dernier métal, paraît être alors, en moyenne, de 1 à 500. On peut, à ce propos, signaler, dans le même groupe des métaux alcalins, le *rubidium*, qui, dans les roches, accompagne le lithium et qui, dans l'eau de mer, est plus abondant que lui (1 de rubidium pour 1.000 de sodium).

Dans les éléments des roches acides (feldspaths et micas), on trouve également des traces très sensibles d'*étain*. L'étain semble se rattacher assez directement à la scorie silicatée, au milieu de laquelle il s'isole parfois en veines ou filons plus importants. Ses affinités connues pour le titane et le zirconium font qu'il apparaît fréquemment, à l'état de traces, dans le rutile et le zircon, de même que les analogies de son oxyde avec la silice expliquent son rôle dans les roches acides.

Le *cobalt* suit très fidèlement le sort du nickel dans les roches basiques. J. Vogt a trouvé, en moyenne, 1 de cobalt pour 10 de nickel. En même temps, il existe souvent, dans les mêmes gîtes, du cuivre, en proportion deux ou trois fois moindre que le nickel.

Nous arrivons enfin au groupe des métaux presque exclusivement con-

centrés dans les filons, dont les conditions de gisement anormales sont par conséquent les seules connues, leur présence normale dans les roches étant réduite à des traces tout à fait indosables.

Pour ces métaux, il peut y avoir quelque intérêt à donner le petit tableau ci-joint qui met en comparaison le nombre de tonnes produites en 1908, le prix moyen de la tonne et le poids atomique, les métaux étant classés dans l'ordre décroissant de leur production.

TABLEAU 3. — RELATION ENTRE LA PRODUCTION, LE PRIX ET LE POIDS ATOMIQUE DES MÉTAUX

MÉTAUX	NOMBRE de tonnes en 1908.	PRIX de la tonne.	POIDS atomique.	MÉTAUX	NOMBRE de tonnes en 1908.	PRIX de la tonne.	POIDS atomique.
Plomb. . .	1 180 000	345	206	Bismuth. .	709	18 000	208
Cuivre. . .	775 000	2 000	64	Or.	653	3 444 000	197
Zinc. . . .	676 000	650	65,4	Molybdène	100	10 000	96
Étain. . . .	112 000	3 600	118	Cadmium .	38	10 000	112
Nickel. . .	16 000	4 000	59	Sels d'uranium. . .	11	100 000	239
Antimoine	10 000	880	120	Platine . .	5	5 000 000	194
Argent . . .	5 885	90 000	108	Bromure de radium pur	15 gr.	400 000 000 000	225
Mercure. . .	3 300	6 500	206				
Tungstène.	1 500	4 000	184				

Dans son ensemble, ce tableau accuse, jusqu'à un certain point, l'augmentation prévue du prix avec la rareté. Mais il apparaît aussitôt que, comme on pouvait le prévoir et peut-être plus encore qu'on ne l'eût prévu, la question commerciale domine en cette matière la question technique. Un métal est produit en petites quantités et paraît rare tant qu'il a peu d'applications. Le jour où ces applications s'accroissent assez pour que la hausse des prix motive des extractions plus difficiles et des recherches plus attentives, ce métal semble aussitôt plus abondant. On en a eu un exemple frappant avec les sels de monazite et, dans une mesure moindre, avec ceux de radium. La teneur moyenne des roches en nickel et même en étain permettrait une extraction supérieure aux chiffres actuels si la consommation devenait plus exigeante.

La même considération fait que la relation entre l'extraction et le poids atomique doit être également troublée. Il y a à cet égard, de grosses anomalies, comme celle du plomb beaucoup trop abondant pour son poids atomique et du nickel, du molybdène, du cadmium, qui le semblent, au contraire, sensiblement trop peu. Pour le reste, la concordance à cet égard est assez approximative.

Il n'est donc pas possible de préciser tant soit peu ce qui concerne la teneur moyenne de ces métaux, dont nous n'avons connaissance que là où ils se sont exceptionnellement concentrés et dont nous recherchons très inégalement ces concentrations suivant nos besoins. Nous ajouterons seulement quelques observations sur les mieux connus d'entre eux à cet égard.

Le *zinc*, qui a des affinités chimiques assez fortes, paraît intervenir quelquefois à l'état de silicate; le *cuivre* se rencontre le plus souvent dans les pyrites, qui existent elles-mêmes incorporées en individus microscopiques dans diverses roches basiques.

Le *plomb* serait chimiquement susceptible d'entrer, comme le zinc, et même mieux encore, dans la composition de la scorie silicatée; car il forme divers silicates. En réalité, on ne le trouve à peu près jamais dans une analyse de roches, si ce n'est peut-être associé avec de l'apatite : ce qui, en dehors des introductions superficielles très probables, pourrait aider à expliquer la formation, sur les affleurements de galène, de pyromorphite, c'est-à-dire d'un chlorophosphate de plomb isomorphe avec l'apatite. Par contre, son abondance filonienne est grande, comme on le sait et comme suffit à le montrer sa très forte production annuelle. Cette abondance, tout à fait imprévue pour un corps de poids atomique aussi élevé, ne paraît guère explicable que par les propriétés chimiques du sulfure de plomb.

Dans leur ensemble, tous ces métaux sont absolument exceptionnels dans les roches, qui constituent l'écorce terrestre¹. Un seul, le *platine*, que l'on exploite uniquement en alluvions, a été considéré d'habitude comme se rattachant aux péridotites, dans lesquelles il paraît en exister des traces et c'est pourquoi nous en avons parlé tout à l'heure à l'occasion des ségrégations basiques. Cependant, la localisation très générale du platine alluvionnaire dans les placers aurifères, la découverte d'un certain nombre de filons aurifères contenant du platine ou de l'osmium d'iridium pourraient provoquer quelques réserves relativement à certains gisements originels du platine.

Proportion relative des métaux associés. — Pour quelques métaux ordinairement associés dans leurs gisements, J. Vogt s'est efforcé de calculer leur proportion relative, afin d'en tirer des conclusions sur la façon dont ces éléments se sont concentrés dans la métallurgie naturelle. Il a trouvé ainsi qu'il pouvait y avoir, en moyenne : 1 d'argent pour 1 000 à 5 000 de cuivre ou de plomb ; 1 d'or pour 25 à 50 ou même 100 d'argent ; 1 de cadmium pour 100 à 1 000 de zinc ; 1 de cobalt pour 10 de nickel ; 1 de manganèse pour 50 à 75 de fer, etc.

On constate de même que, dans les mines de pyrrhotine du Canada, il entre à peu près 1 de platine pour 50 000 de nickel et 1 d'or pour 250 000 du même métal.

Nous avons vu également² qu'il y avait, dans tous les gaz naturels, un rapport à peu près constant de l'argent à l'azote, du crypton à l'argon.

¹ FR. SANDBERGER avait cru reconnaître la plupart de ces métaux (cuivre, bismuth, antimoine, plomb, argent, etc.), dans les silicates des roches. W. STELZNER a montré, au contraire, qu'ils n'y existent, très exceptionnellement, qu'à l'état de traces sulfurées. Nous aurons à revenir plus d'une fois sur ce sujet.

² Page 17.

CHAPITRE II

CLASSIFICATION MÉTALLOGÉNIQUE DES CORPS SIMPLES

Principe de la classification. Associations métallogéniques naturelles. — La classification métallogénique, dont nous allons exposer les principes, a pour but de faire ressortir les associations métallogéniques et de rapprocher autant que possible les corps simples dont les composés naturels s'associent dans leurs gisements, de manière à dresser une série continue, où les affinités de ces composés se trouvent mises en évidence et à déterminer l'ordre dans lequel devront être placées ultérieurement nos études de détail. Elle empruntera ses données à ces descriptions ultérieures, dont elle se trouvera par là constituer un premier aperçu très rapide.

Il sera facile de voir que cette classification concorde souvent avec celle généralement usitée en chimie. Elle en diffère néanmoins à bien d'autres égards, et c'est sur ces différences qu'il conviendra d'insister. Cela tient à ce que le point de vue n'est pas le même. Ici nous fonderons uniquement nos assimilations sur les effets d'une métallurgie naturelle qui a rassemblé ou séparé les éléments chimiques suivant certaines propriétés de leurs composés ayant eu seules l'occasion d'intervenir, tandis que d'autres, auxquelles les chimistes attachent justement de l'importance, ne sont pas entrées en jeu. Néanmoins il pourrait y avoir intérêt, même pour la chimie, à tenir compte davantage de ces conditions de gisement naturelles. Nos cristallisations de voie aqueuse ou de voie ignée se sont, en effet, produites dans des conditions de durée, de masse et souvent de température, de pression, d'homogénéité, que le laboratoire ne saurait réaliser et qui doivent, dans leur ensemble, correspondre à un cas beaucoup plus général que ceux auxquels on se restreint d'ordinaire. J'appellerai notamment l'attention sur la part que semblent avoir prise, en métallogénie, les solutions très étendues à action très lente. Il s'est réalisé ainsi bien des dissolutions et des cristallisations que l'on néglige trop souvent pour considérer surtout les réactions rapides en liqueur concentrée. En outre, au lieu de mettre seulement en présence un petit nombre de corps, on a des ensembles beaucoup plus complexes. Les ségrégations ignées accusent, de leur côté, l'intervention de solutions solides que l'on a les moyens de suivre dans leurs diverses étapes. Enfin, nous n'aurons pas à nous occuper ici de la pureté des corps qui a été si rarement réalisée pour les métaux et qui rend les observations à leur sujet si fréquemment contradictoires.

Quoique nous ayons, dans le chapitre précédent, cherché à mettre en évidence un classement primitif des atomes terrestres suivant leur densité, ce n'est pas cette seule densité qui peut servir de base à notre classification¹. Quand nous cherchons ici à classer les corps d'après leurs affinités naturelles et d'après leur place normale dans l'écorce terrestre, il faut, en effet, se rendre compte de ce que nous nous trouvons faire et des conditions où nous observons ces corps simples, à l'état de combinaisons.

Tout d'abord, a dû intervenir la classification primitive que j'ai essayé de démêler, classification fondée sur la densité des atomes, et non, on le remarquera, sur le poids atomique : ce qui explique pourquoi, tout en se rapprochant dans une certaine mesure de l'ordre des poids atomiques pour les chefs de file des familles naturelles, elle s'en écarte quand on envisage les autres éléments du même groupe. Il en est résulté une première répartition naturelle, qui a rendu tel ou tel élément plus ou moins fréquent dans telle ou telle zone plus ou moins profonde ou plus ou moins excentrique de la Terre².

Après quoi se sont produits, dans l'ensemble de la scorie silicatée, des départs par fusion ignée, qui ont donné : d'un côté, une scorie légère, ou acide ; de l'autre, une scorie lourde ou basique. Les éléments, compris dans le bain métallique qui a subi cette scorification, sont allés alors d'un côté ou d'un autre par une série de raisons où est intervenue fortement encore la densité, la plupart vers les roches acides où les entraînaient des facilités de départ plus grandes, et il en est résulté des magmas distincts pour la métallogénie comme pour la pétrographie.

C'est seulement ensuite, et parfois dans des secondes ou troisièmes fusions, que chaque groupe de roches, les unes acides, les autres basiques, a commencé à éprouver les réactions de métallurgie naturelle qui constituent la métallogénie proprement dite : réactions différentes suivant qu'il s'agissait d'une roche acide ou d'une roche basique.

Dans cette opération, les métaux se sont divisés en trois groupes principaux : 1° ceux qui, avec ou sans l'intermédiaire des chlorures, se sont rapidement combinés à l'oxygène et fixés ainsi ; 2° ceux qui se sont combinés de suite au soufre et qui ont subi un départ filonien plus ou moins prononcé ; 3° enfin ceux qui sont restés à l'état natif. Toute notre classification est d'abord fondée sur cette première division, qui nous amènera, avec une illogique apparente, à envisager : dans un cas, les propriétés des oxydes ; dans l'autre, celles des sulfures, ou des combinaisons assimilables avec les métalloïdes de la même famille, et, ce qui est plus grave, à considérer : pour la plupart des oxydes, des réactions de voie ignée à haute température ; pour la plupart des sulfures, des réactions hydrothermales à température relativement basse.

Malgré les ressemblances reconnues par les chimistes entre le rôle du soufre et celui de l'oxygène, il n'y a pas de raison absolue pour que ces

¹ On sait que, dans la classification de Mendéléeff, les propriétés des corps simples, comme les formes et les propriétés des combinaisons, sont des fonctions périodiques de la grandeur des poids atomiques.

² Nous avons déjà indiqué, pages 2 à 6, cette succession de phénomènes qui forme la base de toute notre théorie.

deux modes de classification donnent des résultats semblables. Il n'y en a pas non plus pour qu'une classification fondée sur les propriétés des composés corresponde aux propriétés des corps simples entrés dans cette combinaison, malgré un préjugé, analogue à celui des alchimistes, qui nous porte inconsciemment à imaginer que l'atome reste lui-même et garde ses propriétés (si mal connus de nous) en se combinant.

Mais allons plus loin. Dans chaque groupe, pourquoi les corps se sont-ils associés les uns aux autres pour former nos groupements minéralogiques ? Ils l'ont fait par deux raisons tout à fait distinctes, pour ne pas dire opposées, d'où résultent deux groupes d'associations indépendants : les uns parce qu'ils étaient analogues ; les autres parce qu'ils étaient complémentaires et se retenaient l'un l'autre. Ainsi la chaux et la baryte vont ensemble comme homologues ; la silice et la chaux parce qu'elles se neutralisent. Une classification réellement logique ne saurait être rectiligne et continue, comme celle que nous devons néanmoins établir pour déterminer l'ordre de notre exposition. Rigoureusement il faudrait la placer sur une série de cercles concentriques permettant à la fois des comparaisons suivant les rayons et les circonférences. Tout au moins serait-il nécessaire de la disposer, comme nous l'avons fait page 39, sur deux colonnes parallèles destinées à pouvoir être lues chacune d'un bout à l'autre. Dans la colonne de gauche, nous avons en principe les éléments basiques, dans la colonne de droite les éléments acidifiables. Plus généralement, les éléments pris respectivement dans ces deux colonnes se neutralisent, soit par leurs associations directes, soit par celles de leurs composés oxydés.

Cette méthode entraîne un inconvénient évident. Dans la description, où nous serons forcés de confondre nos deux colonnes, elle nous amènera parfois à intercaler un groupe parallèle entre deux groupes voisins de la même colonne, qui se trouveront ainsi disjoints. Nous avons cherché autant que possible à éviter ce défaut. Néanmoins, il ne nous a pas été possible d'éviter une coupure dans la série des métaux proprement dits, étant donné que nous tenions à mettre en évidence les rapports naturels des éléments confondus dans la scorie silicatée et y jouant, les uns le rôle de bases (groupe du potassium au manganèse), les autres le rôle d'acides (groupe du silicium, du zirconium, de l'étain, etc.).

Avantages théoriques de la classification métallogénique. — En résumé, notre classification sera empirique et ne vaudra que pour les conditions naturelles, où elle a été établie. Mais, et c'est le point sur lequel je voudrais maintenant insister, cet empirisme correspond à des conditions naturelles particulièrement importantes, parce qu'elles ont eu, pour se réaliser, des durées de temps presque illimitées et qu'elles ont pu, par suite, aboutir à un équilibre stable dans les conditions où elles se trouvaient placées : conditions, qui sont elles-mêmes les plus intéressantes de toutes pour nous, étant celles que nous considérons comme normales puisque c'est au milieu d'elles que nous vivons.

Les équilibres réalisés par la Nature peuvent porter sur des mélanges qui ont été autrefois chauffés momentanément à de hautes températures. Mais les groupements qui se seraient faits dans ces réactions calorifiques

ont eu, depuis lors, des siècles nombreux pour se remettre en équilibre dans les conditions du milieu extérieur où ils ont été ultérieurement placés. Il est probable que, dans la plupart des cas, ce que nous observons, c'est l'effet d'une transformation lente, par suite de laquelle l'énergie surabondante a été dépensée extérieurement et les atomes groupés de manière à conserver le moins possible de travail chimique disponible et à former des espèces susceptibles de coexister sans réagir, comme si elles étaient mortes : ou bien des métaux natifs, quand ces métaux n'ont pas d'affinités marquées (platine) ; ou des oxydes et des sulfures neutres (oxyde d'étain, sulfure de zinc) ; ou, si les oxydes et les sulfures sont acides ou basiques, des combinaisons avec des bases ou des acides qui les neutralisent (carbonate, phosphate, titanate, niobate, tungstate de chaux ; silicates de potasse, chaux, alumine, manganèse ; sulfo-arséniures ou sulfo-antimoniures de cuivre, argent, plomb).

La loi thermo-chimique, d'après laquelle une réaction tend à se produire dans le sens d'un dégagement de chaleur, n'est, il est vrai, qu'une loi approximative, puisqu'il faudrait substituer le mot énergie mécanique au mot chaleur ; elle ne serait vraie qu'au zéro absolu ; mais, quand nous restons à des températures assez basses comme celles de l'atmosphère terrestre, elle peut être considérée comme suffisamment exacte.

Ainsi se sont opérés peu à peu les groupements cristallins que nous rencontrons dans la nature et que nous avons souvent tort de considérer comme s'étant réalisés du premier coup. La forme cristalline stable est une sorte de mort, tandis que la vie consiste, pour la matière comme pour les êtres organisés, dans une lutte où se défendent et se reconstituent des équilibres instables.

La chimie du temps. — Jusqu'à quel point ont été poussées ces transformations lentes, il serait difficile de le préciser. Cependant, au risque de choquer les idées habituelles, on peut se demander incidemment s'il n'est pas intervenu quelque chose de semblable dans le cas pétrographiquement le plus typique des réactions ignées, pour le granite. Ce granite, tout nous l'indique, a dû commencer par se former en profondeur et à une température relativement élevée. On avait alors, dissous l'un dans l'autre, un magma feldspathique acide et un magma ferro-magnésien basique. Puis le refroidissement s'est produit et, même si le massif granitique aujourd'hui visible à la surface est resté à deux ou trois kilomètres de profondeur, sa température résultant du degré géothermique n'a été que d'une centaine de degrés. Enfin les mouvements tectoniques l'ont ramené au jour ou presque au jour. S'est-il bien constitué de prime abord à l'état de granite, comme on le suppose implicitement ? Peut-être a-t-il alors commencé par donner une sorte de verre homogène, qui aurait ensuite subi une lente dévitrification amenant au groupement actuel. C'est une hypothèse plausible pour expliquer son étonnante homogénéité cristalline sur de si grandes étendues, avec une égale répartition générale d'éléments chimiques aussi simples que la silice, l'alumine, les alcalis et la chaux, entre les trois mêmes minéraux rencontrés partout en proportions à peu près équivalentes. Enfin, ultérieurement, un groupe de réactions superficielles, très différentes de cette évo-

lution lente et spontanée, tend à détruire complètement le granite en kaolinisant les feldspaths.

Dans des proportions bien moindres, on a le droit de supposer quelque chose d'analogue pour les gisements filoniens hydrothermaux, avec cette différence qu'ici la température primitive a dû elle-même être, comme nous le dirons, peu élevée. En tout cas, si nous observons dans un filon qui, depuis longtemps, reste à une température ne dépassant pas une centaine de degrés, certaines formes cristallines, c'est, suivant toutes vraisemblances, que ces formes sont stables à cette basse température. Mais, ce qui constitue une différence fondamentale avec les minéraux du premier groupe, nous pouvons en moyenne admettre que ces minéraux se sont formés de suite et ne résultent pas d'un remaniement.

Ainsi la Nature nous offre le résultat, lentement obtenu, de réactions que nous nous efforçons plus ou moins heureusement de reproduire rapidement dans nos laboratoires en faisant intervenir des catalyseurs, ou minéralisateurs. Cette intervention des catalyseurs dans nos synthèses n'est qu'un artifice pour masquer notre impuissance à prolonger assez les expériences, comme l'a fait la Nature et il est possible que, dans bien des cas, celle-ci se soit passée de ces catalyseurs. Nous ne croyons pas cependant qu'il faille pousser cette idée trop loin. Nous rencontrons souvent, dans les minéraux cristallisés, des restes appréciables de ces éléments auxiliaires, qui nous prouvent qu'ils sont bien réellement intervenus ; et certains équilibres actuels, également stables à la température de 100 à 400 degrés, qui paraît le maximum de celles où ont pu se former les remplissages filoniens, ont pu, du premier jour, prendre la forme qu'ils ont encore. A plus forte raison, les minerais que nous supposons s'être produits au-dessous de 100 degrés. Nous serons, d'ailleurs, amenés à faire intervenir ces métalloïdes dans un autre but, en leur conservant le nom de minéralisateurs, qui introduit quelques confusions de langage entre chimistes et géologues. Les minéralisateurs seront essentiellement, pour nous, non pas des catalyseurs comme l'entendait Sainte-Claire Deville, mais des éléments de fumerolles qui auront, par leur combinaison avec les métaux, pu contribuer à leur donner de la mobilité, et à permettre ainsi la minéralisation des filons.

Interprétation du tableau. — Le tableau ci-joint résume notre classification. Nous allons exposer rapidement comment il a été établi, afin de justifier l'ordre que nous suivrons plus tard dans l'étude des divers éléments chimiques et de leurs produits utilisables.

TABLEAU 4 — CLASSIFICATION MÉTALLOGÉNIQUE DES CORPS SIMPLES

Périphérie de l'atmosphère.	Hydrogène.	
Atmosphère	Helium.	Oxygène, Azote.
Métalloïdes facilitant le départ des métaux		Fluor, Chlore, Brome, Iode. Soufre, Sélénium, Tellure. Carbone. Bore.
Eléments auxiliaires en combinaisons oxydées.		Phosphore, Vanadium.
Eléments auxiliaires en combinaisons sulfurées		Arsenic, Antimoine, Bismuth, Molybdène.
Scorie silicatée normale, ségrégations oxydées et filons oxydés de départ immédiat.		
1 ^o Métaux à oxydes acides. NO $\frac{4}{2}$		Silicium, Titane, Zirconium, Etain.
— — — NO $\frac{5}{2}$		Niobium, Tantal.
— — — NO $\frac{8}{3}$		Uranium.
— — — NO $\frac{6}{2}$		Tungstène.
2 ^o Métaux à oxydes basiq. NO $\frac{1}{2}$	Potassium, Sodium, Lithium, Cæsium, Rubidium.	Combinaisons avec l'oxygène.
— — — NO $\frac{2}{2}$	Calcium, Baryum, Strontium, Magnésium, Glucinium.	
— — — NO $\frac{3}{2}$	Terres rares, Aluminium, Chrome, Fer.	
— — — NO $\frac{4}{2}$	Manganèse.	
Métaux de la scorie basique, pouvant s'isoler en sulfures.	Nickel, Cobalt.	Combinaisons avec le soufre.
Filons sulfurés de cristallisation moyennement profonde, à gangue quartzreuse et calcaire.	Cuivre. Zinc, Cadmium, Plomb. Argent.	
Filons sulfurés, à cristallisation superficielle	Mercure.	
Métaux natifs. En roches acides		Or.
En roches basiques	Platine.	

Nous avons déjà fait prévoir notre première grande entrée de classification: à savoir une division en quatre familles comprenant la première, les métalloïdes, que nous rencontrerons plus tard combinés avec les éléments suivants pour leur donner de la mobilité et faciliter leur départ vers la superficie, éléments d'autant plus actifs qu'ils sont plus électro-négatifs; la seconde, les métaux pouvant exister en profondeur combinés avec l'oxygène, métaux qui, pour la plupart, sont des éléments normaux et constants de la scorie silicatée, mais dont quelques-uns pourtant (nickel, cobalt, fer, peut-être manganèse), peuvent se présenter également à l'état de sulfures filoniens; la troisième, les métaux, qui sauf des traces insignifiantes englobées dans les silicates, s'associent toujours avec le soufre ou son groupe dans leurs gisements profonds; la quatrième, les métaux natifs.

Comme le montre la première colonne, ces groupements chimiques correspondent à des types de gisements métallogéniques tout à fait distincts.

Nous avons attaché une importance spéciale à séparer les uns des autres, les deux groupes de corps qui se présentent associés, les uns à l'oxygène avec passage possible par la forme chloro-fluorée (jusqu'au tungstène et au manganèse inclusivement), les autres au soufre ou à ses homologues. C'est, en métallogénie, un des traits les plus fondamentaux et les plus caractéristiques qui distinguent les éléments normaux de la scorie silicatée et ceux qui s'en sont à peine séparés par un départ filonien acide de ceux pour lesquels l'intervention des minéralisateurs du groupe sulfuré a déterminé un départ filonien de plus en plus accentué. Dans le premier cas, on peut dire qu'en principe dominent les réactions de voie ignée, avec volatilisation possible à haute température; dans le second cas, les réactions de voie aqueuse ayant pu se réaliser à des températures de plus en plus basses jusqu'à la superficie. Le fer, le nickel, le cobalt, que l'on trouve dans les minerais inaltérés, tantôt avec l'oxygène, tantôt avec le soufre, forment une transition entre les deux groupes.

L'oxygène et le soufre, que les chimistes rapprochent volontiers pour certaines propriétés analogues (bivalence, etc.), nous apparaissent ainsi comme représentatifs de deux groupes tout à fait distincts. Cela tient précisément à ce que, dans des conditions toutes différentes, ils prennent un rôle comparable.

Le soufre, comme l'oxygène, forme, avec les métaux, des acides, des bases et des composés neutres; d'où des sels de sulfures assimilables aux sels d'oxydes. Le sulfure d'arsenic est un acide qui se combine avec le sulfure de cuivre ou le sulfure d'argent, sels basiques, comme la silice saturée la potasse ou la chaux. Le sulfure de zinc échappe à la combinaison des autres sulfures par sa neutralité, comme l'oxyde d'étain ne se combine pas d'ordinaire à la silice et s'isole.

Sans entrer encore dans le détail de la discussion, chacun de ces groupes nécessite quelques observations de principe.

Aux métalloïdes nous avons associé l'arsenic, l'antimoine, le molybdène et le bismuth. L'arsenic et l'antimoine jouent, dans nos gisements, un rôle tout à fait analogue à celui du soufre ou du tellure, se combinant

avec des métaux pour donner des espèces cristallisées. Ils le font d'une manière un peu spéciale. Bien qu'il existe un assez grand nombre de combinaisons directes entre l'arsenic ou l'antimoine et des métaux (Löllingite, FeAs^2 ; leucopyrite, FeAsS^3 ; nickeline, NiAs ; chloanthite, NiAs^2 ; breithauptite, NiSb ; domeykite Cu^2As^2), où l'on n'a pas signalé la présence du soufre, le plus généralement, l'arsenic et l'antimoine interviennent en sulfosels jouant le rôle d'acides, qui se combinent d'ordinaire avec des sulfures métalliques basiques. Ces combinaisons avec le soufre peuvent également exister isolément (or piment, stibine) comme si elles étaient neutres.

Le molybdène a été ajouté hypothétiquement à leur groupe. On le trouve ordinairement à l'état de sulfure isolé; mais, dans les filons de plomb, l'apparition d'un molybdate de plomb, la wulfénite, par altération superficielle, peut laisser soupçonner un sulfo-molybdure de plomb profond. On trouve également, pour le bismuth, des bismuths sulfurés cuprifères ou plombifères (wittichénite, empletite, cosalite, patrinite, chiviatite, à côté des formes fréquentes: le sulfure de bismuth (bismuthine), le sulfo-tellurure (bornine).

Dans le groupe oxydé, nous avons séparé les éléments acidifiables qui se rapprochent des métalloïdes et les éléments basiques analogues aux métaux. Nous avons ensuite classé chacun de ces groupes par familles dans l'ordre des combinaisons stables qu'ils réalisent avec une proportion d'oxygène de plus en plus forte à la température normale quand cet oxygène est en excès. On aurait pu envisager, au contraire, les combinaisons à plus haute température réalisées en milieu plus réducteur, telles que celles dont les silicates de nos roches nous offrent des exemples. La première méthode nous a paru plus logique.

On remarquera que tous les métaux basiques de ce groupe existent normalement en association avec la silice. La proportion d'oxygène qui se combine avec un atome du métal va en croissant d'une extrémité à l'autre dans chaque groupe acide ou basique. Dans le groupe basique, il y a, en même temps, sinon d'une façon absolue, au moins en moyenne, tendance croissante à l'acidité et à l'électronégativité¹.

Enfin, dans le groupe des bases, on voit, encore simultanément croître la profondeur moyenne de cristallisation, qui correspond, d'autre part, à un accroissement de la densité atomique. Le groupe des alcalis s'associe avec de la silice en excès dans des roches acides ou légères: ce qui peut d'abord sembler singulier, étant donnée sa basicité énergique. Le groupe alcalino-terreux, qui se termine par le magnésium, est d'autant plus caractéristique des roches basiques et lourdes que l'on tend davantage vers le magnésium. L'aluminium en excès, le chrome et le fer sont déjà des métaux de ségrégations basiques que l'on peut considérer comme une accentuation du type basique.

Les conditions de cristallisation du groupe sulfuré sont toutes diffé-

¹ Cette règle, qui est à peu près exacte pour les oxydes d'un même métal, comporte, nous le savons, des exceptions quand on passe d'un métal à l'autre (par exemple les terres rares $\text{NO}^{2/2}$ plus basiques que la glucine NO); elle peut cependant être admise comme une moyenne.

rentes. Au lieu d'être resté dans la scorie ou à son voisinage tout à fait immédiat, le métal y a subi un départ et il est logique de suivre les progrès de ce départ dans l'ordre où il s'est effectué ; ce qui nous conduit à partir de la scorie silicatée (généralement d'une scorie acide ou neutre) pour nous élever progressivement dans l'écorce. Ainsi seulement nous pouvons laisser le cuivre à peu de distance de l'étain et de son groupe, comme il se rencontre dans les gisements. Il ne faut pas s'étonner, dès lors, si, reprenant la série de bas en haut, nous partons des métaux les plus électropositifs pour arriver à ceux qui le sont moins.

Enfin, nous ne réservons, pour le groupe des métaux natifs, que l'or et le platine. Le cas de l'or est douteux, comme nous le verrons. Une grande partie de l'or doit être en combinaison avec le groupe du soufre et la plupart de l'or natif n'est qu'un produit de remaniement. Néanmoins l'or a pu rester partiellement à l'état natif ou se reprécipiter directement de son chlorure en milieu acide. Et cela nous permet de conserver à ce métal la place spéciale que l'on a l'habitude de lui attribuer.

Le platine et sa famille ne posent pas le même problème, puisque le platine est connu presque exclusivement à l'état natif.

Il n'y a pas lieu d'en rapprocher les autres métaux que l'on trouve à l'état natif, comme le cuivre et l'argent (persistants à de grandes profondeurs), ou le mercure, le bismuth, l'arsenic (produits superficiels). Ces métaux sont des résultats assez nets de la décomposition des sulfures et l'on peut se demander, pour les premiers, s'il n'y a pas à considérer une action galvanique tenant aux conditions dans lesquelles se présente le milieu précipité.

Cette classification, comme toutes les autres, est critiquable, parce qu'elle établit nécessairement des coupures dans une série continue. Nous allons, dans un instant, montrer qu'un corps déterminé ne se rencontre pas seulement dans le groupe où nous l'avons fait figurer, mais peut prendre, de part et d'autre, une extension, dont l'amplitude apparente dépend en partie du soin avec lequel on s'est trouvé le chercher dans les diverses catégories de gisements. Nous avons surtout essayé de mettre en relief les associations naturelles ; mais il ne peut s'agir que d'associations normales et fréquentes ; car, si on voulait pousser les choses à l'extrême, il n'est peut-être pas un rapprochement quelconque, si imprévu soit-il, celui du mercure et du platine par exemple, qui n'ait été au moins une fois réalisé. Avec ces réserves, nous allons essayer de montrer que la série ainsi obtenue rapproche les corps qui se rencontrent associés et écarte ceux dont les gisements diffèrent.

1° Éléments de l'atmosphère. — Il est inutile d'insister sur les éléments gazeux de l'atmosphère qui ne se rattachent qu'indirectement à notre sujet. Nous rencontrons, soit libre, soit combinés, un comburant l'oxygène, un combustible, l'hydrogène, généralement combiné au premier et un groupe inerte dont l'azote est l'élément essentiel. Le rôle de l'*hydrogène*, qui commence sans doute, comme nous l'avons dit¹, dans une enveloppe extérieure et périphérique de notre atmosphère, qui se

¹ Page 16.

continue à la surface en combinaisons avec l'oxygène, l'azote ou le carbone, devient à peu près nul dès qu'on s'enfonce. Celui de l'azote est également insignifiant en profondeur. Au contraire, l'oxygène prend une place capitale dans toute l'épaisseur de la scorie silicatée, bien qu'on y voie nettement sa proportion diminuer quand on s'approfondit. Nous avons montré plus haut comment l'oxygène s'opposait au soufre dans nos groupements comme caractéristique d'une série parallèle.

2° Métalloïdes facilitant le départ des métaux. — Dans les métalloïdes susceptibles de faciliter le départ des métaux (minéralisateurs), nous donnons la première place au groupe du fluor.

Le groupe du *fluor* et du *chlore*, auxquels s'associent accessoirement le *brome* et l'*iode*, a dû jouer, dans les cristallisations des roches et des minéraux filoniens, un rôle, dont on peut avoir une idée par l'abondance des fumerolles chlorurées dans le volcanisme actuel, comme par la persistance de chlorures et de fluorures dans les minéraux et qui a, sans doute, été très supérieur à l'idée que l'on peut en concevoir d'après les faibles quantités de ces corps retenues dans l'apatite, la fluorine, l'émeraude, etc. La grande solubilité des chlorures et fluorures a commencé par faire que ces combinaisons se sont, à l'exception de la fluorine, rarement déposées dans les filons et ne se retrouvent dans les roches qu'à l'état d'inclusions, accidentellement emprisonnées. Ces chloro-fluorures se traduisent, pour nous, par des minerais oxydés qu'a produits la réaction de la vapeur d'eau sur des chlorures ou oxychlorures (formation de la cassitérite, de l'oligiste, de la crocoïse, etc.). De plus, cette même solubilité a eu pour résultat que les chlorures des roches ont été partout enlevés là où des eaux profondes ou superficielles se sont trouvées à leur contact. Tous ces chlorures sont ainsi allés vers la mer et dans les produits d'évaporation saline, où nous les retrouvons. Cependant on reconnaît le rôle du chlore dans les apatites, celui du fluor dans le même minéral, dans les fluorines, cryolites, tourmalines, etc.

Quant au brome et à l'iode, ils ont à peu près complètement disparu des roches et filons pour la même raison (sauf dans des réintroductions superficielles, qui ne sont pas en cause) et leur place est dans les sédiments marins, dans la mer et dans les organismes. La pulvérisation dont résultent les sédiments a eu pour effet d'en extraire tout ce qu'il existait de ces métalloïdes et de les mettre à la portée des plantes qui en concentrent des proportions imprévues.

Le groupe du *soufre* est un des plus homogènes de la métallogénie. Le *soufre*, le *sélénium*, le *tellure* peuvent fréquemment se substituer les uns aux autres. Le soufre est, au sens où nous employons ce mot, le minéralisateur par excellence des filons hydrothermaux ordinaires. C'est lui que l'on trouve associé aux métaux les plus habituels dès que l'on s'enfonce dans un de ces filons, tandis que, pour le cuivre, le nickel, le cobalt, le zinc, le plomb, l'argent, le mercure et l'or, l'oxygène disparaît, quand on s'approfondit.

Nous plaçons ensuite le *carbone*, dont la place pourrait, on l'a vu¹, être dis-

¹ Page 18.

cutée: élément normal de l'atmosphère sous forme d'acide carbonique; présent comme hydrocarbure ou oxyde de carbone dans l'enveloppe gazeuse des comètes; représenté d'autre part dans toutes les roches, y compris les météorites, qui nous semblent des spécimens de magmas très profonds ayant échappé en partie à l'oxydation; fréquent dans les dégagements volcaniques (ce qui correspond à l'observation précédente); mais aussi abondamment développé dans les filons métallifères, même en profondeur, à l'état de carbonates, d'inclusions d'acide carbonique liquide, de gouttelettes bitumineuses, etc. La présence des carbonates de chaux, de magnésie, de fer, dans la profondeur des filons, comme les synthèses de Friedel obtenant simultanément le feldspath et le quartz par un peu de carbonate alcalin, laissent supposer l'existence de l'acide carbonique dans les magmas profonds et peut-être la formation de carbonates alcalins par un déplacement de la silice analogue à celui qui se produit dans les altérations superficielles.

Le *bore* a été longtemps rapproché du carbone. On l'en sépare aujourd'hui avec raison. Cependant, comme minéralisateur, il vient se placer dans un groupe contigu. Le bore est intervenu dans la cristallisation de nombreux minéraux associés aux roches acides, comme on peut admettre l'intervention des carbonates alcalins dans celle du feldspath et du quartz des mêmes roches. Les soffioni boriqués, s'ils ont bien une origine éruptive, seraient également comparables aux mofettes d'acide carbonique, comme un produit superficiel et attardé du volcanisme. Les combinaisons possibles du bore avec le soufre dans des produits naturels plus profonds préparent à ce que nous allons rencontrer dans le groupe du soufre.

Le *phosphore* aurait pu être rapproché de l'azote chimiquement, si sa place métallogénique n'était toute différente. Le phosphore nous apparaît d'abord à la surface comme élément de la vie organisée. A cet égard, il s'associe avec la plupart des métalloïdes et des premiers métaux, les plus communs à la surface de la Terre. Il est facile d'en comprendre la cause. La vie organisée n'a pu prendre ses éléments d'activité que dans le milieu où elle s'est constituée et, logiquement, c'est parmi les plus abondants qu'elle a dû être amenée d'abord à puiser ceux qui lui étaient nécessaires pour maintenir les équilibres instables de ses réactions vitales.

D'autre part, le phosphore est un élément abondant de la scorie silicatée, où il a joué le rôle d'acide pour scorifier la chaux, ou, plus exceptionnellement l'alumine ou le fer. Enfin, nous le trouvons fréquemment dans les filons à type stannifère associé au chlore et au fluor, ou encore dans les dépôts ferrugineux de roches acides du type Kirunavara. Son association avec le chlore paraît tenir, comme celle du soufre avec l'arsenic, non à ce qu'ils ont eu le même rôle, mais à ce que le phosphore a été entraîné par le chlore à l'état volatil et amené ainsi à saturer des bases diverses.

Dans l'ordre d'idées métallurgique, les scories basiques nous offrent une association fréquente du phosphore et du vanadium avec le fer, l'aluminium et le calcium par voie ignée. Quand ces produits se décomposent à la surface, on a divers minéraux, formant, par leurs associa-

tions, une chaîne continue : minerais de fer phosphoreux, minerais de fer alumineux, bauxites ferrugineuses ; d'où une sorte de série, dans laquelle chaque corps s'associe d'abord avec ses voisins et, plus faiblement, avec ceux qui sont plus éloignés de lui : Ca-Ph-Fe-Al.

Le cas du *vanadium* est discutable. Par certains côtés, qui nous paraissent les principaux, ce corps se rapproche du phosphore. Il existe, comme celui-ci, disséminé dans les minerais de fer en proportions beaucoup moindres et a dû commencer par se rassembler dans les ségrégations basiques avec le fer, le chrome, le titane. Ses minerais sont, pour la plupart, des combinaisons d'oxyde V_2O_5 avec des bases métalliques, plomb, zinc, cuivre, bismuth, comme dans le cas du phosphore, parfois avec une intervention du chore qui rappelle l'apatite, avec laquelle la vanadinite est isomorphe.

D'autre part, la forme des oxydes, comme l'association avec l'urane et le molybdène, font penser à certains caractères de l'uranium et nous voyons apparaître, exceptionnellement, un sulfure de vanadium et de cuivre. Il est possible que de tels sulfures aient joué un rôle dans le développement des vanadates sur les affleurements des filons plombifères.

Chimiquement, c'est, on le sait, un réducteur très énergique et, dans les analyses, on le retrouve à côté du tungstène qui forme des tungstates, comme lui des vanadates. Ces dernières observations, qui assignent au vanadium une place secondaire dans la famille des minéraux du groupe de l'étain, ne sont pas incompatibles avec l'assimilation au phosphore : métalloïde qui apparaît dans le même groupe. Le vanadium est donc une transition entre les métalloïdes et les métaux.

Nous plaçons au voisinage et également dans une position intermédiaire entre les métalloïdes et les métaux, le groupe de l'*arsenic*, de l'*antimoine*, du *bismuth*, du *molybdène*, qui présente une individualité spéciale, comme nous l'avons dit plus haut, et se caractérise par son association ordinaire avec le soufre. Chimiquement, les trois premiers de ces corps sont souvent rapprochés de l'azote et du phosphore (classification Moissan). Ils se caractérisent, en outre, par leur éclat métallique. En métallogénie, nous trouvons toujours l'arsenic et l'antimoine uniquement dans des remplissages filoniens, où ils se présentent presque toujours combinés avec le soufre (stibine, soufre et antimoine ; réalgar et or piment, soufre et arsenic) ; ou encore à l'état de sulfosels métalliques tels que le mispickel, les cuivres gris, argents rouges, boulangérite, bournonite (avec du fer, du cuivre, de l'argent, du plomb), ou la nagyagite dans laquelle le tellure intervient. Ils sont ainsi moins les similaires du soufre que ses complémentaires.

Le *bismuth* se rapproche de l'antimoine par sa fusibilité. Il est triatomique et donne un chlorure décomposable par l'eau. Son rôle est un peu différent parce que son sulfosel, au lieu d'être acide, est neutre et s'isole, par suite, sans entrer en combinaison. Il intervient, dans nos filons, comme un véritable métal, que des associations fréquentes rapprochent de l'étain ou du cuivre. Sa place dans notre série reste, par conséquent, douteuse. Quand le bismuth abonde avec l'étain, c'est, d'ordinaire, avec l'étain associé au cuivre. Le bismuth entre égale-

ment dans des groupements filoniens avec le cobalt. Enfin il ne faut pas oublier que certains gisements associent le bismuth et l'or d'une façon tellement intime que la présence de l'un des métaux fait, dans le triage, reconnaître celle de l'autre.

Le *molybdène*, qui est encore un métal des dépôts filoniens acides, se rapproche de l'étain, du tungstène et de l'urane dans beaucoup de ses gisements, où il apparaît à l'état sulfuré (molybdénite). Dans quelques autres, il se montre sous une forme plus problématique, celle du molybdate du plomb, mais qui, selon nous, a toutes les chances pour avoir été formée superficiellement aux dépens de molybdénite ou d'un sulfo-molybdure de plomb, inclus dans les clivages de la galène. Les filons où le molybdène se révèle ainsi sont néanmoins d'un type plus franchement sulfuré que les précédents et se rapprochent du groupe plombifère que nous trouverons plus loin. D'ailleurs, quand le molybdène existe dans le groupe stannifère, c'est d'ordinaire avec le cuivre. Le molybdène offre donc les mêmes difficultés de classement que le bismuth.

3° Scorie silicatée, groupe acide. —Après les métalloïdes, si nous abordons le groupe de la *scorie silicatée*, nous le voyons nettement divisé en deux parties : d'une part, les éléments acidifiable et électro-négatifs, qui se rapprochent à certains égards des métalloïdes ; de l'autre, les éléments basiques et électro-positifs, dont les derniers tendent à se combiner parfois avec le soufre et préparent ainsi la transition au groupe des filons sulfurés. Un premier groupe, comprenant le silicium, le titane, le zirconium et l'étain, est susceptible de former des oxydes cristallisés isolément et sans combinaison avec des bases.

Le *silicium*, qui a été autrefois rapproché du carbone et du bore, s'en distingue totalement pour nous par son rôle essentiel dans la constitution de la scorie silicatée, dont il est, avec l'oxygène et l'aluminium, l'élément le plus typique et dont il forme à lui seul 28 p. 100. C'est à lui que revient le rôle de neutraliser les bases de cette scorie, qui est, avant tout, un silicate d'alumine et d'alcalis. Quand les réactions ignées cessent d'intervenir, il se sépare peu à peu des bases pour cristalliser isolément à l'état de quartz.

Au groupe du silicium, la chimie associe volontiers aujourd'hui le *titane* ainsi que l'*étain*. En métallogénie, nous avons également de nombreuses raisons d'admettre ces deux rapprochements. On trouve, dans la scorie rocheuse, des titanates comparables aux silicates et du rutile analogue au quartz. Quant à l'étain, il intervient à l'occasion, sous la forme de cassitérite, comme élément constituant des roches. Le fait que ces deux corps se présentent dans la pratique exclusivement en combinaisons oxydées, tend également à les assimiler au silicium ; mais, pour l'étain, le rapprochement est peut-être plus intime encore avec l'uranium et le tungstène, qui offrent les mêmes conditions de gisement que l'étain et dont nous parlerons ensuite.

Le *zirconium* fait partie intégrante de la scorie rocheuse, à l'état d'oxyde très rare, de silicate simple ou complexe et de titanate. Son gisement est analogue à celui de l'étain, du tungstène, etc.

En chimie, le zirconium ressemble au silicium. La zircone, que l'on avait d'abord notée Zr^2O^3 , s'écrit aujourd'hui généralement ZrO^2 pour marquer sa ressemblance avec SiO^2 et TiO^2 . Cette zircone se combine aux bases des métaux alcalins et alcalino-terreux. La chimie est donc d'accord avec la métallogénie pour placer le zirconium dans le groupe de l'étain. Quant à l'objection qui pourrait résulter de l'existence d'un silicate de zirconium, elle se trouve levée si on interprète SiO^2Zr , comme une association de deux substances isomorphes ZrO^2 et SiO^2 , susceptibles de cristalliser chacune séparément.

Enfin, l'étain, qui est le premier métal important rencontré dans cette liste, peut servir de caractéristique à tout un groupe métallique et minéralogique. En association intime avec des granulites, il se trouve dans des filons, où l'on rencontre aussi du tungstène, de l'uranium, du bismuth, du molybdène, de l'arsenic, de l'or, et des minéraux à origine fluorée comme la cryolite, la fluorine, la tourmaline, l'émeraude, la topaze, les phosphates divers (apatite, amblygonite wawellite, etc.). Quoique l'on connaisse théoriquement un sulfure d'étain, la stannine, comme on a des sulfures d'arsenic, d'antimoine, de bismuth et de molybdène, l'étain est, jusqu'aux plus grandes profondeurs de ses gisements, combiné avec l'oxygène. Il intervient, à l'état d'inclusions, dans les roches acides, comme peuvent le faire le titane ou le silicium. Mais il ne se combine pas, comme ceux-ci, avec des bases pour former ici des stannates. Neutre plutôt qu'acide, l'oxyde d'étain a été amené à rester seul.

Le niobium et le tantale auraient pu être placés un peu plus haut avant le titane et l'étain, puisqu'ils ne forment pas de filons. Leur valence, qui les a fait parfois comparer au phosphore, conduit à les intercaler entre l'étain et l'uranium. Ce sont encore des éléments normaux, quoique réputés rares, de la scorie silicatée, dont les sels ont souvent cristallisé dans les granulites ou les pegmatites et qui apparaissent seulement en combinaisons oxydées.

L'uranium se présente surtout à l'état d'oxyde, soit libre, soit associé à l'acide phosphorique en combinaison avec des bases (uranite, chalcocite), soit enfin disséminé dans toute une série de zirconates, silicates, titanates des terres rares. En tant qu'oxyde libre formant un produit filonien, il rentre bien dans le groupe précédent.

Diverses conditions de gisements le rapprochent du tungstène et de l'étain, entre lesquels nous le plaçons. L'absence de combinaisons sulfurées d'uranium naturelles n'autorise pas à le placer plus loin dans le groupe du cobalt, avec lequel il a d'autres affinités de gisements. Par son grand poids atomique (239,5), par sa désagrégation en radium, il tient une place à part.

Le tungstène existe en combinaisons avec des bases (manganèse, fer, calcium) sous une forme exclusivement oxydée, dans des gisements filoniens associés aux roches acides, où l'on peut trouver, en même temps, l'étain, ou quelquefois l'uranium et le molybdène. Ses rapports métallogéniques avec l'étain sont tout à fait intimes et ne permettent pas de séparer ces deux corps que l'on rencontre presque toujours ensemble et dont l'un annonce l'autre. Mais le tungstène, donnant un oxyde acide, se présente dans les filons sous une forme assez spéciale, en

combinaison avec les bases, comme peuvent le faire le titane ou le phosphore.

4° Scorie silicatée, groupe basique. — Le groupe des métaux basiques englobés dans la scorie silicatée commence par la série alcaline qui, elle, ne prête guère à discussion. Les *métaux alcalins* se trouvent à peu près exclusivement dans les roches (feldspaths, micas, etc.), ou dans les eaux qui ont circulé au contact de ces roches et en ont dissous des éléments et, par conséquent, dans la mer. La grande solubilité de leurs sels fait qu'on n'en constate guère la présence dans les filons métallifères proprement dits, où cependant il est probable que des eaux alcalines ont dû intervenir. C'est au plus si on retrouve quelques feldspaths alcalins dans des filons passant plus ou moins à des quartz de pegmatites. Dans la métallurgie naturelle, les alcalis paraissent avoir contribué à faciliter les mélanges et, par conséquent, les concentrations de métaux dans les roches acides.

Dans la scorie silicatée, ces métaux alcalins représentent un premier groupe moins avide d'oxygène ($\text{NO}^{1/2}$). Puis va venir le groupe du calcium, du baryum, du strontium, du glucinium et du magnésium, que l'on peut écrire $\text{NO}^{3/2}$. Après quoi, nous trouverons le type aluminium, fer, chrome, que nous noterons $\text{NO}^{3/2}$: les formes stables du fer et du chrome en minéralogie étant les sesquioxides comme pour l'aluminium ; et enfin le type manganèse, $\text{NO}^{1/2}$. A mesure que la proportion d'oxygène associée au métal augmente, on passe d'oxydes fortement basiques à des oxydes neutres.

Le groupe du *calcium*, du *baryum*, du *strontium* est classique. Il correspond, dans nos gisements, à leur présence simultanée dans les roches et dans les filons, avec tendance cependant à prédominer dans les roches et à être plutôt secondaires dans les filons, en dehors des remises en mouvement fréquentes. Donnant des sels suffisamment solubles, ces corps ont passé, dans une certaine mesure, à la mer, moins cependant que les métaux alcalins plus solubles du groupe précédent. La caractéristique du groupe calcium est la facilité, avec laquelle, après avoir commencé à se dissoudre, il se reprécipite au voisinage. Ce qui se passe sous une forme bien connue pour les stalactites calcaires ou les veines de calcite dans les lézardes des constructions, a lieu également pour le baryum et le strontium dans des fissures superficielles, sur des affleurements de filons. Baryum et strontium, dont l'origine première est dans les feldspaths des roches, se sont très ordinairement concentrés dans des affleurements filoniens, où on les voit disparaître en profondeur.

Le *magnésium* offre, en géologie, beaucoup d'analogies avec le calcium, auquel il s'associe dans son minerai le plus ordinaire, la dolomie, dans les roches cristallines, les gangues de filons, etc. Il est l'élément le plus caractéristique des roches basiques, tandis que les métaux alcalins vont vers les roches acides, surabondantes en silice. Par là il tend vers le groupe des ségrégations basiques, envisagé plus loin.

La place du *glucinium* dans ce groupe est contestable et on l'a parfois rapproché de l'aluminium¹ plutôt que du magnésium ou du calcium. Aussi

¹ L'hydrate de glucine se comporte comme la magnésie.

nous l'avons intercalé entre les deux groupes. C'est encore un métal que nous connaissons seulement comme constituant de la scorie silicatée, associé sous la forme de glucine (GIO) avec la silice et l'alumine, comme peuvent l'être les métaux précédents dans les feldspaths, ou encore à l'état de fluophosphate comme le calcium dans l'apatite. Le cymophane GlAlO^4 correspond au spinelle MgAlO^4 . La phénacite est un silicate de glucine Gl^2SiO^4 . Il semble y avoir du glucinium disséminé dans certains calcaires, comme on y trouve, plus fréquemment et plus abondamment, du magnésium. Sa valence est contestée. On le considère, en général, comme bivalent, parfois comme trivalent.

La place des *terres rares* est avec les bases fortes alcalino-terreuses plutôt que terreuses. La plupart des analogies chimiques sont dans ce sens. D'autre part, certaines analogies chimiques avec l'aluminium ont souvent conduit à adopter la formule R^3O^3 . Quant au *thorium*, il forme une base très faible, la thorie ThO^2 . Et l'oxyde cérique CeO^2 a des fonctions à la fois basiques et acides.

Cette famille partage, avec tous les éléments précédents, la propriété de rester confinée dans la scorie silicatée en combinaison habituelle avec la silice, ou, plus rarement, avec l'acide phosphorique, l'acide titanique, le fluor, etc. Sa zone de cristallisation est dans l'aurole des roches alcalines à silice abondante, spécialement des roches à feldspathoïdes.

L'*aluminium* est, nous l'avons vu, avec le silicium, l'élément fondamental de la scorie silicatée. Il commence par s'associer avec la silice dans un groupement que complètent d'ordinaire les oxydes alcalins ou alcalino-terreux. La forme de son association avec l'oxygène le rapproche également du fer et du chrome, que nous allons trouver dans les ségrégations oxydées, et le fait que le chrome n'existe pas en combinaisons sulfurées, mais seulement à l'état d'oxyde, tend à placer ce métal très près de l'aluminium, quoique dans un autre groupe.

Nous plaçons ici le *chrome* avant le fer, auquel il s'associe souvent dans la nature (fer chromé, etc.) et près de l'aluminium, auquel il peut se substituer également dans une série de minéraux : chromite, spinelle chromifère (picotite), rubis, saphir, grenat, micas, émeraudc, etc. Le chrome est encore un métal que nous trouvons exclusivement à l'état oxydé et presque uniquement dans la scorie même ou ses ségrégations, bien qu'une forme filonienne commence à apparaître : la crocoise, où le chrome, associé au plomb, joue un rôle attribué, dans d'autres minéraux, au vanadium, au molybdène, au tungstène, etc. Le départ ordinaire du chrome s'est fait dans la scorie basique et correspond à la présence de ce métal dans les météorites, la mine de platine, etc. Mais il y a également eu un départ acide, où intervient l'anhydride chromique (sans doute après passage à l'état d'acide chlorochromique).

La place du *fer* dans la série est difficile à définir, précisément à cause de sa très grande abondance, qui aboutit à une sorte d'ubiquité dans tous les groupes de gisements. Très aisément remis en mouvement, le fer a sans cesse changé de place dans l'écorce, pris et repris par des réactions successives, souvent de sens contraire. Pour déterminer sa place réelle, il faut, bien entendu, commencer par faire abstraction de ses concentrations sédimentaires, malgré leur importance industrielle. Il faut aussi, ce

me semble, quoique avec plus d'hésitation, laisser de côté les gisements filoniens, et même les ségrégations, malgré l'amplitude que peuvent présenter certaines masses pyriteuses. Avec un métal, qui forme 4,7 p. 100 d'une roche quelconque, la vraie place est dans la scorie même, comme pour tous les autres corps que nous y trouvons communément en abondance, comme pour l'aluminium, le calcium ou le sodium, entre lesquels sa teneur moyenne lui fait une place. Là il est habituellement en combinaisons oxydées comme les autres métaux alcalins ou terreux, et cette forme oxydée se poursuit dans les ségrégations qui, paraissent avoir puisé leur fer dans des magmas basiques plus profonds, où ce métal était en plus grande abondance que dans la scorie superficielle. En présence de ces faits, nous pouvons relativement négliger les fumerolles de chlorure ou de sulfure de fer, qui ont pu se produire, peut-être par une simple réaction acide sur les silicates des roches. En somme, si nous trouvons le fer à l'état de sulfure, les conditions ne sont pas tellement différentes de celles qui existent pour le groupe calcium, baryum, strontium, où ce sulfure a pu préexister à la forme actuelle des sulfates. Le fer, s'il rencontre assez d'oxygène, tend à se stabiliser sous la forme du peroxyde qui est à peu près neutre.

Le *manganèse* a été naturellement rapproché du fer, comme nous le faisons ici, dans les classifications chimiques. On ne saurait, en effet, oublier que ces deux métaux se rencontrent constamment ensemble, que l'un peut se substituer à l'autre dans les mêmes gisements et que cette association se poursuit en métallurgie. Néanmoins, le rôle du manganèse n'est pas sans obscurité. Souvent, et c'est ce qui nous a fait le placer ici, il a dû commencer par exister à l'état de silicates que l'on peut comparer aux silicates de fer. C'est alors, sinon un élément direct de la scorie, du moins un élément très communément introduit par le métamorphisme de profondeur, avec intervention possible du chlorure de manganèse. Il entre, pour une part notable (0,07 p. 100), dans la composition moyenne des roches. Son protoxyde se substitue à d'autres bases bivalentes comme la magnésie, la chaux, la baryte ; son peroxyde peut remplacer de même les sesquioxydes de fer et d'aluminium. En particulier, l'association avec le baryum, qui peut même se substituer à lui dans ses minerais, est extrêmement fréquente.

La petite difficulté vient de ce qu'ailleurs nous voyons souvent le manganèse se développer sur des affleurements filoniens dans des conditions assez mystérieuses : peut-être aux dépens d'un sulfure de manganèse instable, qui aurait commencé par se précipiter en même temps que la pyrite de fer, mais qui aurait alors partout disparu ; peut-être aussi par intervention de silicates ou de carbonates. Il ne faut cependant pas oublier que, quelle que soit l'origine première du manganèse dans ses filons, les formes minéralogiques sous lesquelles nous le rencontrons sont toutes des oxydes et que l'oxyde stable, à la température normale, en présence d'un excès d'oxygène, est le bioxyde. Le sulfure (alabandine) n'est qu'une curiosité.

Enfin les réactions altérantes, qui ont partout concentré le manganèse sur les affleurements, ont eu pour effet d'amener un rapprochement très constant, et pourtant de nature adventive, entre le manganèse et d'autres

corps, qui ont la propriété de se concentrer dans les mêmes conditions, comme l'argent, le baryum, etc.

La place du *nickel* est, soit à l'état d'inclusions de silicates oxydés dans les roches basiques, soit dans des gisements sulfurés de départ immédiat. Le type filonien existe aussi accessoirement pour ce métal. Son rapprochement avec le cobalt est classique ; mais il existe peut-être moins dans les composés que dans les métaux eux-mêmes. Le rôle du nickel s'accroît quand les roches deviennent basiques et quand les métaux s'isolent en oxydes. Quand il y a tendance à un départ sulfuré filonien avec des roches acides, le cobalt prend, au contraire, la prédominance. Les deux groupements bien connus avec le cobalt et avec le fer ne sont pas les seuls. Le nickel accompagne également très souvent le cuivre et, quand il s'associe à du cobalt dominant, celui-ci l'entraîne dans des groupements avec le molybdène, l'uranium, le bismuth, l'argent. La formation nickelo-cuprifère et cobaltifère est souvent à gangue carbonatée et à type basique. La formation nickel-cobalt-bismuth-argent est de préférence à gangue quartzeuse. De tous ces caractères résulte une physionomie assez complexe.

Le *cobalt*, beaucoup plus différent qu'on ne le croit en général du groupe nickel et fer, se présente volontiers dans les mêmes gisements filoniens hydrothermaux liés aux roches acides. D'autre part, comme le cuivre également qui présente un semblable dimorphisme, il s'est différencié avec le nickel et le cuivre par ségrégation ou départ immédiat dans des magmas basiques. Plus les réactions aqueuses paraissent avoir exercé une influence essentielle, plus on semble s'être éloigné du point de départ igné, plus le cobalt l'emporte sur le nickel, qui finit parfois par manquer.

5° **Filons sulfurés.** — Avec le *cuivre*, nous abordons le groupe des filons sulfurés d'origine franchement hydrothermale et relativement superficielle, qui vont prédominer maintenant. Le cuivre, comme le cobalt et l'argent, que nous aurions voulu pouvoir paralléliser davantage avec lui, présente cependant des particularités qui le mettent à part dans ce groupe.

C'est d'abord ses possibilités de départ acide en gangue quartzeuse, qui le font s'associer si souvent avec l'étain. Le groupement étain-cuivre est tout à fait typique et ne saurait être négligé. De même le groupement cuivre-molybdène. D'autre part, on ne doit pas oublier l'association ordinaire du cuivre et de l'argent (chalcopyrites et cuivres gris, si fréquemment argentifères). Mais si, dans certains de ses gisements, le cuivre a éprouvé ainsi un départ à tendance acide, on le voit, par contre, — et c'est ce qui lui fait une individualité très marquée — partir également sous forme de sulfures au voisinage immédiat des roches magnésiennes. A cela correspond la possibilité, pour le cuivre, comme pour tous les métaux suivants, d'avoir, non plus seulement une gangue quartzeuse, mais aussi une gangue carbonatée ou barytique, qui accuse une dissolution à bien plus basse température, dans des conditions plus superficielles. Ces possibilités de dissolution plus facile pour le cuivre entraînent sa présence dans des groupements filoniens variés, en association avec

tous les métaux sulfurés suivants, et son remaniement fréquent par voie de redissolution ultérieure.

Le *zinc* et le *plomb* sont les éléments tout à fait caractéristiques des filons à remplissage sulfuré. On ne les trouve pour ainsi dire que là. Leur place est nettement intercalée entre le cuivre, qui a pu se déposer plus tôt avec l'étain dans des remplissages plus profonds et le mercure, qui s'est déposé plus tard, dans des conditions plus superficielles.

L'*argent* est essentiellement un métal filonien de dépôt hydrothermal, plus ou moins intimement lié, suivant ses gisements, avec des roches éruptives, qui ont ici un caractère beaucoup plus superficiel que dans la plupart des gisements d'étain, de cuivre, ou même de plomb. Bien qu'on trouve souvent l'argent englobé dans le cuivre ou dans l'or, on a l'impression, dans la plupart des districts à minerais complexes, que l'argent est venu après l'or ou monté plus haut. On le trouve également avec les autres métaux de son groupe, cobalt, zinc et plomb. L'argent se présente toujours associé avec le soufre ou l'antimoine, et non plus, comme l'or, avec le sélénium, le tellure et l'arsenic. Sa gangue, qui peut encore être parfois quartzreuse, est souvent aussi calcaire, et les remaniements aqueux ont joué un rôle essentiel dans sa concentration ultérieure, en des zones de cémentation. C'est un métal dont la solubilité a souvent permis un départ comparable à celui du mercure, bien que, dans d'autres cas, on ait des filons d'argent, souvent alors en même temps aurifères, liés étroitement à des roches ignées moins superficielles.

Le cas du *mercure* est un des mieux définis en métallogénie. Ce métal est celui dont la cristallisation filonienne a pris nettement la forme la plus superficielle, au point de pouvoir, à peu près seule, se continuer aujourd'hui encore dans les sources thermales liées aux éruptions volcaniques. Il n'a pu se déposer que dans des fissures exceptionnellement minces. Il s'y associe, tantôt avec de la silice, tantôt avec de la calcite, et ses remises en mouvement ont été d'une facilité extrême.

6° Métaux natifs. — L'*or* est d'autant plus difficile à classer qu'on ne sait pas au juste sous quelle forme réelle il se présente dans son gisement principal qui est la pyrite de fer aurifère. Nous l'avons considéré comme métal natif de la scorie acide. C'est la place à laquelle fait penser l'existence si fréquente de filons à or natif. Mais il ne faut pas s'illusionner à ce sujet. Dans la plupart des cas, cet or natif est le résultat d'une altération superficielle, de ce que nous appelons une remise en mouvement, et la forme primitive reste inconnue. Il est possible que le chlorure d'or soit intervenu pour donner de l'or natif, ou, ailleurs, de l'oxyde, comme pourraient le faire présumer les rapprochements très fréquents de l'or avec le groupe de l'étain, avec celui du bismuth, de l'antimoine, de l'arsenic, avec le cuivre, avec le cobalt ou même avec l'argent : en un mot, avec toute une série de métaux associés aux roches acides. Ailleurs, on trouve des associations très nettes de l'or avec le tellure ou avec le sélénium, qui indiquent une affinité pour le groupe du soufre.

Enfin le *platine* représente le cas très particulier d'un métal qui nous

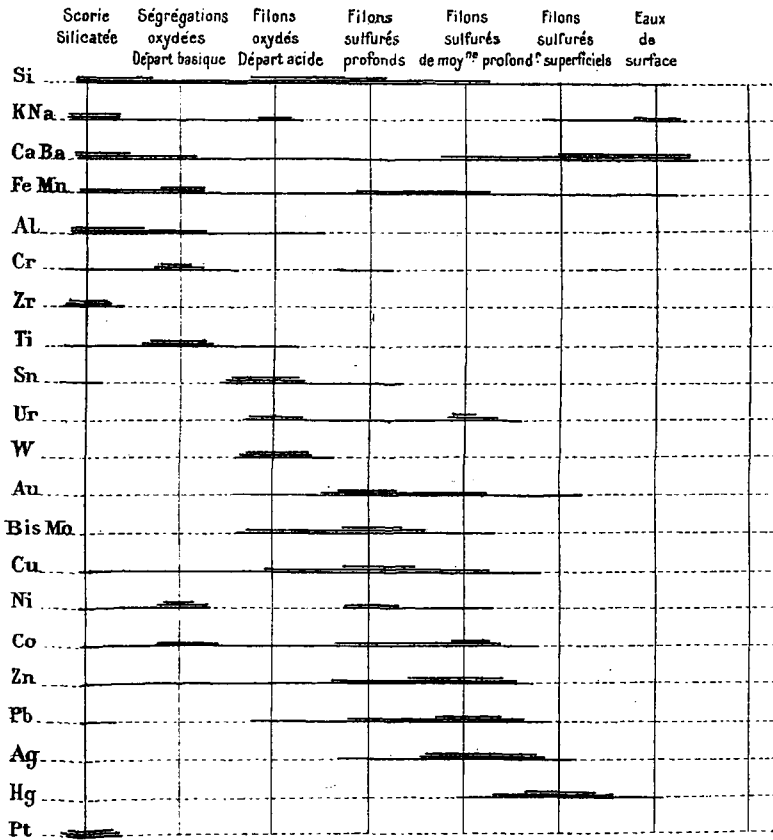


Fig. 1. — Schéma des réactions originelles de voie interne.

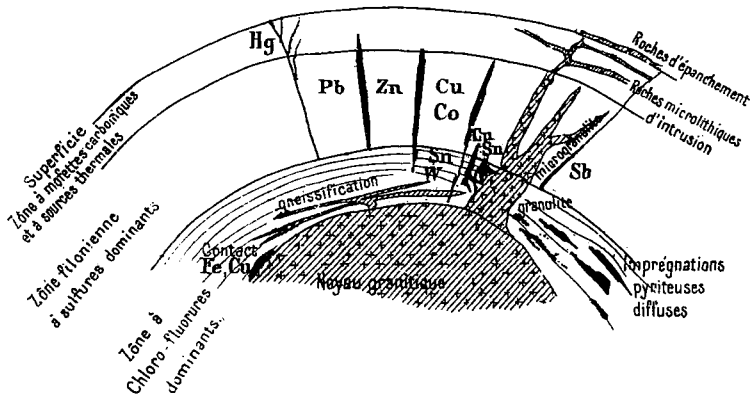


Fig. 2. — Schéma de la pénétration métallifère autour d'un noyau granitique.

est exclusivement connu à l'état natif dans des roches, particulièrement profondes et pauvres en oxygène, que l'on peut considérer comme des fonds de creuset basiques.

CONCLUSION

Le premier schéma de la page précédente (fig. 1) a pour but de mettre en évidence, sous une forme graphique, la zone d'extension des principaux métaux, et leur abondance respective dans chaque groupe, abstraction faite des métalloïdes. On remarquera qu'à strictement parler, il n'est pas de métal qui ne dût figurer dans la première colonne relative à la scorie silicatée. Nous y avons mentionné seulement ceux qui y sont dosables. Les deux colonnes suivantes représentent deux départs en sens inverse, l'un basique, l'autre

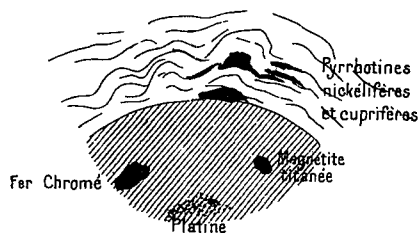


Fig. 3. — Schéma des minerais en relation avec un noyau basique.

acide. On ne doit donc pas s'étonner que la ligne de l'étain s'interrompe au départ basique et celle du nickel au départ acide.

Les corps figurant sur une même verticale ont des chances pour se trouver assemblés, dans la proportion figurée par le nombre des traits superposés.

Les figures 2 et 3 représentent, sous une autre forme, les rapports des métaux les plus caractéristiques avec les roches ignées et le type de métallisation suivant les profondeurs. Les schémas relatifs aux divers métaux y ont été, pour plus de clarté, supposés juxtaposés, et non superposés comme ils le sont en réalité. On peut voir, sur la figure 2, un premier aperçu des métaux reliés à un magma acide et, sur la figure 3, de ceux reliés à un magma basique.

CHAPITRE III

LES LOIS GÉNÉRALES DE LA MÉTALLOGÉNIE

COMPARAISON AVEC LES PHÉNOMÈNES ACTUELS. — ÉTUDE DE QUELQUES PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX. — INFLUENCE DES TRACÉS

Dans les pages qui précèdent, nous nous sommes trouvé déjà faire plus d'une allusion à la théorie métallogénique qui va être développée ici. Avant d'en examiner les points fondamentaux l'un après l'autre, il convient de préciser cette théorie dans son ensemble le plus général et d'exposer sommairement sur quels faits d'observation actuels elle se fonde.

Comme nous l'avons déjà remarqué, la nature nous offre les éléments chimiques à l'état disséminé dans la portion restreinte de l'écorce terrestre qui nous est accessible, ou, par l'analyse spectrale, elle nous permet de retrouver ces mêmes éléments dans l'enveloppe extérieure des astres. Ce qui nous apparaît ici en désordre, nous concevons qu'un ordre primitif a dû autrefois le régir et nous nous proposons de remonter par la pensée vers cet ordre primitif en partant de l'apparent chaos actuel : de refaire, par conséquent, en sens inverse, le chemin parcouru par les concentrations anormales qui forment l'objet de nos études métallogéniques¹. Si nous arrivions, d'une part, à concevoir cet ordre primitif et, d'autre part, à discerner pourquoi et comment, par quelles opérations successives de métallurgie naturelle cet ordre a été modifié progressivement de manière à déterminer l'état de choses présent, nous aurions résolu le problème fondamental de la métallogénie.

Dans cette recherche, nous avons déjà tenté un premier pas, le plus difficile, celui où on sent le terrain le moins assuré. Nous avons remarqué que les couches périphériques de la Terre, dans lesquelles nous avons un accès direct, offrent une certaine composition moyenne que nous avons analysée et qu'il s'y rencontre, en quelques points rares, des concentrations exceptionnelles de métaux qui, partout ailleurs, dans cette même écorce superficielle, semblent manquer presque totalement. Nous sommes arrivés ensuite à la conclusion que, dans la Terre encore fluide, les atomes ont commencé par être groupés dans un ordre théorique, dont l'écorce actuelle présente la composition moyenne pour la zone qu'elle a occupée et que, sur des points d'élection plus ou moins nombreux, des bouffées métalliques internes, émanées de zones plus profondes, auront, très anciennement, apporté les métaux exceptionnels, qui ont fini plus tard par s'y concentrer de la manière que nous observons.

¹ Ce sont les étapes successives que nous avons distinguées, pages 2 à 6.

Le jour où la croûte silicatée, une fois consolidée et recouverte par les produits de condensation des vapeurs supérieures, a commencé à s'épaissir, à se déformer, à se disloquer, à subir des intrusions de magmas ignés internes restés en fusion ou refondus, on est entré dans une phase différente qui, sauf à atténuer peu à peu son intensité, s'est prolongée jusqu'à aujourd'hui. C'est celle, sur laquelle va porter désormais tout notre effort.

Tandis que, pour apprécier la première phase cosmique dont il a été question d'abord, nous avons presque pour seul moyen d'observation une analogie probable avec les astres, pour la phase postérieure à la consolidation de la croûte, nous nous croyons en droit de comparer avec une grande vraisemblance les phénomènes anciens aux phénomènes actuels, à la condition seulement de faire intervenir, comme notion essentielle, celle de la profondeur. C'est en partant de cette idée que nous avons déjà ramené les phénomènes de la métallogénie à deux groupes de réactions principales : réactions ignées et réactions aqueuses, ces dernières pouvant à leur tour être profondes ou superficielles. Aux réactions ignées se rattachent les inclusions et les ségrégations métalliques, que l'on peut envisager comme des solutions solides ; aux interventions aqueuses les solutions liquides qui, en profondeur, ont donné les dépôts filoniens proprement dits et qui, dans la zone superficielle, les ont ultérieurement modifiés et remis en mouvement. Qu'il s'agisse de solutions solides ou liquides, c'est un fait d'observation que les gisements représentent tous chimiquement des phases complexes, où des composés nombreux ont dû agir les uns sur les autres, dans des conditions variables de température et de pression, avec intervention possible de très longues durées.

GRANDES CATÉGORIES DE GISEMENTS MÉTALLIFÈRES

Principaux types de gisements. — Comment se présentent les gisements minéraux et métallifères, la suite de ce livre l'expliquera assez en détail. Dans l'ensemble, les cas suivants, sur lesquels nous aurons sans cesse à revenir, apparaissent aussitôt en se bornant aux apparences premières, sans en chercher encore l'explication.

Tantôt les minéraux utiles se présentent disséminés dans une roche ignée au même titre que les éléments constituants normaux de cette roche. Il se trouve seulement — et c'est un fait attribuable sans doute à une cause très profonde ou très ancienne — que toute la roche renferme, dans une région déterminée, une proportion spéciale du minéral recherché : ce qui la rend industriellement exploitable. C'est ce que nous appelons les gisements d'*inclusions*.

Ailleurs, et toujours dans l'intérieur des roches ignées, sur certains points favorables beaucoup plus localisés, un minéral se trouve rassemblé, concentré en proportion exceptionnelle. Et, lorsqu'on fait l'analyse de la roche au voisinage, on voit qu'il y a concentration progressive de cet élément par un accroissement de teneur qui, de la périphérie, gagne le centre. Ce sont les *ségrégations* proprement dites : résultat d'une différenciation qui, au sens strict du mot, a opéré sans intervention d'éléments volatils, tels que le soufre ou le chlore, par simple liquation, et dont l'expression est, par suite, un métal natif ou un oxyde.

Ailleurs encore, la concentration minérale devient plus indépendante des roches ou terrains qui l'encaissent, tout au moins d'une partie de ces roches ou terrains et nous nous rapprochons du type filonien. Cependant certains des minerais ainsi constitués apparaissent toujours liés à une catégorie de roches déterminée, parfois même englobés dans une gangue silicatée résultant de l'action de cette roche sur un calcaire : ce sont les *gîtes de départ immédiat* ou *de contact*, dont la forme est toujours celle d'un amas limité. On passe de là à des *imprégnations diffuses*.

Puis viennent les cas, de beaucoup les plus nombreux, où le minéral utile incruste une fissure de forme quelconque ou imprègne un terrain auquel il a pu encore se substituer, constitue ce qu'on appelle, dans les exemples les plus typiques, un *filon* avec toutes ses variétés : *stockwerks*, *filons-couches*, *amas filoniens*, *gîtes de substitution*, etc.

Enfin il arrive, comme terme extrême, que le gîte métallifère dépende d'un sédiment encaissant, ainsi que, dans notre premier cas, il dépendait d'une roche ignée : qu'il en fasse partie intégrante. Nous avons alors un *gîte sédimentaire*, dont la forme et la continuité peuvent varier, suivant l'âge du terrain encaissant, suivant sa nature physique, etc.

Mis en présence de ces localisations diverses, on est logiquement amené à penser que, dans les deux cas extrêmes, les minéraux, lorsqu'ils dépendent strictement d'une roche ignée, ont été formés, comme celle-ci, par des réactions calorifiques ou, lorsqu'ils sont exclusivement associés à un sédiment, ont été produits par voie sédimentaire. Et c'est ce que prouve, en effet, leur examen direct, appuyé sur les expériences de reproduction synthétique¹. Les minerais englobés dans les roches ignées sont identiques à ceux que la voie ignée permet de reproduire. Les minerais sédimentaires, pour lesquels ne s'accuse pas un simple remaniement mécanique, dont la preuve est toujours facile à établir, se montrent tels qu'on les obtient par voie de dissolution aqueuse à la température normale. Il ne saurait donc y avoir de discussion pour les cas réellement typiques de l'un ou l'autre mode de gisement. Et c'est seulement sur les cas intermédiaires que peut porter la controverse.

Dans ces cas intermédiaires (*gîtes de départ immédiat*, *de contact*, ou *filons*), la conclusion la plus probable d'un premier examen minéralogique est que des réactions, à la fois calorifiques et aqueuses, sont intervenues dans des proportions variables suivant les cas. La plupart des cristallisations et des associations que nous constatons ne peuvent être reproduites à ce que nous appelons la température normale. Pour le plus grand nombre d'entre elles, dans tous les cas filoniens, il n'est pas douteux qu'il y ait eu dissolution et non fusion. Pour quelques-unes, où l'on peut imaginer une fusion (*gîtes de départ immédiat*), il apparaît vite que cette fusion a pu difficilement être une simple fusion sèche et qu'il y a eu présence d'éléments volatils, tout au moins de vapeur d'eau, probablement aussi de chlorures, sulfures, etc.

¹ J'ai résumé ces expériences de synthèse et les conclusions que l'on peut en tirer sur le mode de formation des minéraux dans la *Science géologique*, p. 134 à 137.

Arrivé là, on est conduit, pour pousser plus loin, à diviser les phénomènes actuels, dont l'étude peut contribuer à la solution des problèmes métallogéniques, en plusieurs grandes catégories : réactions de voie ignée (volcanisme et fumerolles) ; réactions hydrothermales ; réactions des eaux froides par dissolution, ou par déplacement mécanique. Nous laisserons de côté, au moins dans ce premier aperçu, les autres forces agissantes à la surface de la Terre, qui ne semblent guère avoir pris part aux concentrations minérales : la simple gravité, les vents, etc. Mais nous devons, pour les autres, chercher, dans les observations actuelles, des points de comparaison nécessaires.

COMPARAISON DES GITES MÉTALLIFÈRES AVEC LES PHÉNOMÈNES ACTUELS¹

Réactions ignées. Volcanisme. — En fait de *réactions ignées* actuelles, susceptibles de nous servir de guides dans l'étude métallogénique, nous ne pouvons étudier que le volcanisme ancien ou récent et les opérations métallurgiques de nos usines.

Ce n'est pas ici le lieu d'examiner le volcanisme dans tous ses effets ni dans ses causes. Si on l'envisage simplement en ce qui concerne la production des métaux, on peut d'abord faire une observation négative. La forme superficielle du volcanisme, celle qui attire notre attention par sa violence et ses paroxysmes, ne produit pour ainsi dire pas de dépôts métalliques. Un peu d'oxyde de fer, des traces de manganèse, de cuivre ou de plomb, quelques dépôts mercuriels dans des sources thermales de régions volcaniques, puis, comme minéraux, du soufre, du réalgar, de l'or piment ; et c'est à peu près tout. Le cas du mercure sera à retenir pour nous. En le groupant avec beaucoup d'autres observations, nous arriverons à conclure que le mercure est peut-être le seul métal dont le dépôt se continue sous nos yeux à la superficie et dont la solubilité à l'état de sulfosel ait permis anciennement l'apport hydrothermal jusqu'aux orifices extérieurs des filons.

Dans tous les autres cas, on est conduit à penser que les phénomènes métallifères anciens, en relation probable avec les manifestations ignées, ou bien ont à peu près complètement cessé de se produire aujourd'hui, ou bien se poursuivent seulement à une profondeur où ils nous échappent et qu'ils sont connus seulement dans leurs manifestations plus anciennes parce que les accidents tectoniques et les érosions en ont ramené plus tard les dépôts à la surface. La première hypothèse est très soutenable. Toute l'histoire de la Terre montre que notre globe a passé par des périodes d'inégale activité tectonique et métallogénique, avec de longues phases de repos interrompues par des paroxysmes. Il serait tout à fait inexact de penser que son état actuel doive nous présenter une image fidèle de tous les phénomènes anciens avec la même intensité. Néanmoins, si cette première explication doit être

¹ Une fois pour toutes, il me paraît inutile de reproduire ici des études qui pourraient se rapporter à notre sujet, mais qui ont été déjà traitées suffisamment dans d'autres ouvrages et notamment dans ma *Science géologique*, à laquelle on me permettra de renvoyer, ou dans ma *Formation des gites métallifères*, 2^e édit., p. 28.

retenue, la seconde nous paraît de beaucoup la plus importante. Nous possédons, en effet, par la géologie, un moyen de pénétrer en pensée dans les profondeurs des volcans qui nous sont aujourd'hui inaccessibles. Il suffit d'envisager des coupes de plus en plus profondes du phénomène éruptif, telles qu'elles nous sont fournies par des volcans de plus en plus anciens et de plus en plus profondément érodés. Tant qu'il reste une partie de l'appareil volcanique extérieur, les filons métallifères ne commencent que très rarement à apparaître. Le principal métal reste le mercure. Cependant on connaît, par exemple, à Cripple Creek, au Colorado, quelque chose qui ressemble bien à un volcan démantelé avec d'innombrables filons d'or et des cheminées basaltiques à ciment aurifère. De l'argent commence également à se montrer dans les mêmes conditions.

Dès qu'on s'enfonce dans un massif volcanique ancien, comme on peut le faire au Mexique, au Colorado, en Hongrie, en Arménie, au Japon, à Célèbes, etc., on entre, au contraire, dans une zone puissamment métallisée, où les filons métallifères abondent de tous côtés et se montrent étroitement liés aux types de roches microlithiques qui sont montées en dykes à travers les terrains ou les roches antérieures. Là nous saisissons, en quelque sorte, sur le fait, la relation des métaux, qui, pour la plupart ici, appartiennent au groupe sulfuré (fer, zinc, plomb, cuivre, argent, or, etc.) avec les roches ignées et il ne nous restera plus qu'à rechercher la manière dont ces métaux s'en sont séparés.

Ailleurs, nous pouvons atteindre des régions plus profondes encore, lorsque nous étudions une chaîne de plissement ancienne comme les chaînes calédonienne ou hercynienne, dans lesquelles les roches microlithiques d'intrusion superficielle ont été à peu près éliminées, tandis que dominent les roches plus profondes, à types microgranitiques ou granitiques. Là nous voyons, avec les sulfures qui persistent, se montrer progressivement d'autres métaux, tels que l'étain, le tungstène, dont les minéraux profonds ne sont plus sulfurés mais oxydés. En même temps, comme nous le dirons plus tard, la forme des vides incrustés se modifie et les filons se réduisent souvent à des imprégnations diffuses et lenticulaires.

Enfin, nous avons l'impression très nette que, lorsque nous nous enfonçons assez dans l'intérieur d'une zone tectonique ancienne à intrusions ignées, les filons disparaissent totalement, comme il était logique de le prévoir, surtout si on suppose leur métallisation émanée d'un magma igné situé à une profondeur relativement faible dans l'écorce. La conclusion très générale d'un examen sommaire portant sur l'ensemble des filons métallifères est donc que ces filons représentent une zone d'incrustation limitée par en bas comme par en haut, zone liée à la pénétration interne de certains magmas rocheux et que les dimensions verticales de ces minéralisations sont de l'ordre que nous pouvons aborder par nos travaux de mine, surtout si l'érosion a déjà enlevé toute la partie haute du gisement pour n'en laisser subsister que la racine.

Ayant ainsi quelque idée du lien qui peut rattacher nos gîtes métallifères aux roches ignées, lien que nous préciserons plus tard, nous pouvons nous demander aussitôt comment s'est faite la séparation et la con-

centration des métaux, sauf à revenir ultérieurement en détail sur les phénomènes que nous allons nous borner à mentionner.

En ce qui concerne nos gisements d'inclusions ou de ségrégations, la nature ne nous offre actuellement, en voie de formation, rien de semblable. Mais les opérations métallurgiques de nos usines peuvent, dans une certaine mesure, nous renseigner. Nous sommes là en présence de scories silicatées qui ne diffèrent pas essentiellement de celles qu'on obtient dans le traitement de nos minerais, et les condensations minérales qu'on y observe sont comparables à ces noyaux réalisés par des actions de liquation, par le contact d'une paroi froide, par l'introduction d'un élément étranger, etc.

Pour les gites filoniens divers, il est évident que le phénomène est autre. La plupart de ces filons nous offrent des associations minérales impossibles à réaliser par fusion, toutes naturelles au contraire par dissolution : par exemple, un groupement de cuivre natif, d'argent natif et de calcite, du quartz isolé côte à côte avec des bases, du sulfure d'antimoine ou de la chalcosine avec du quartz, etc. Le passage des métaux par une dissolution aqueuse est si net qu'il n'a guère été discuté depuis le jour où l'on a commencé ces études. Mais l'eau a-t-elle agi seule et à basse température ? C'est ce qu'on a parfois soutenu. Des théories, qui ont eu leur heure de vogue, admettaient un simple lessivage prolongé des roches encaissantes par des eaux superficielles déterminant la dissolution progressive des traces métalliques disséminées dans ces roches pour aboutir à leur concentration. Sous une autre forme, avec des eaux thermales au lieu d'eaux froides, la théorie a encore ses défenseurs. Et nous serons conduits, en effet, à admettre des réactions de ce genre dans quelques cas spéciaux que nous discuterons plus tard. Mais, en thèse générale, nous croyons que, dans la relation si nette des gites métallifères filoniens avec les roches ignées, autre chose est intervenu, dont nous voyons l'action présente jusque dans le volcanisme superficiel et dont nous retrouvons l'indice très vraisemblable dans les minéralisations anciennes : ce sont les *fumerolles*.

Fumerolles Pneumatolyse. — Rappelons d'abord en quoi consistent, à ce sujet, les observations actuelles. On sait que des laves volcaniques se dégagent, en grande abondance, des matières volatiles accompagnées de vapeur d'eau¹ : matières volatiles probablement empruntées en grande partie à la fusion des roches profondes et à des réserves souterraines, mais pouvant aussi être enrichies par des pénétrations d'eaux superficielles avec matières salines. La composition de ces fumerolles se modifie, non par l'addition, mais par la disparition de certains éléments, à mesure que la température de la lave s'abaisse : soit qu'on examine celle-ci à un point plus éloigné de sa sortie au jour ; soit, en un même point, après qu'elle est restée plus longtemps à l'air ; soit même dans une phase postérieure de l'éruption.

L'étude de ces fumerolles conduit à admettre que la lave contenait en

¹ En opposition formelle avec les expériences d'Armand Gautier, qui montrent le rôle de l'eau dans toutes les roches les plus profondes, la théorie du volcanisme anhydre a été récemment soutenue par A. BRUX (*Recherches sur l'exhalaison volcanique*, Genève, 1911) ; mais les conclusions de ce savant, malgré leur apparence de précision, ne nous paraissent nullement démontrées.

profondeur un certain nombre de gaz emprisonnés, particulièrement des *gaz réducteurs et combustibles*, tels que l'hydrogène, l'hydrogène carboné, l'hydrogène sulfuré, des chlorures divers et que ces gaz se sont incomplètement oxydés dans la cheminée d'appel qui constitue le cratère.

En résumé, on peut dire que la lave volcanique monte vers la surface en apportant une grande quantité de vapeur d'eau et de gaz volatils, qui s'en dégagent peu à peu à mesure qu'elle se refroidit et dont la composition, d'abord très complexe, se simplifie ainsi progressivement à mesure que la température de la lave s'abaisse.

Dans la profondeur, il semble bien que ces gaz soient des gaz réducteurs dépouillés d'oxygène, ainsi que toutes les études de métallogénie conduisent également à l'admettre pour les fumerolles anciennes, auxquelles on peut attribuer l'incrustation des filons métallifères. Ce caractère réducteur s'explique d'ailleurs très aisément, si l'on remarque que l'eau même, dans les conditions profondes du volcanisme, doit nécessairement se dissocier et fixer son oxygène sur les magmas fondus en train de se scorifier, mettant, par conséquent, de l'hydrogène en liberté. Mais, en montant dans la grande cheminée d'appel que constitue le cratère, ces gaz réducteurs, tels que l'hydrogène, l'hydrogène carboné, l'hydrogène sulfuré, etc., s'oxydent peu à peu et, à moins que l'éruption ne se fasse sous la mer, c'est-à-dire à l'abri du contact de l'air, les gaz arrivent, pour la plupart, au jour brûlés et oxydés.

L'ordre de dégagement des fumerolles volatiles, ramené à ses termes les plus simples, comprend :

1° Depuis les températures les plus hautes jusqu'à 100°, des chlorures dominants ; d'abord, des chlorures anhydres avec traces de fluor au-dessus de 500° (chlorures de sodium, de potassium, d'ammonium, etc.) ; puis, les chlorures alcalins disparaissant, du chlorhydrate d'ammoniaque avec une légère proportion relative d'acide sulfureux, qui apparaît vers 400° ;

2° Vers 100°, de l'hydrogène sulfuré prédominant, avec un peu de chlorhydrate d'ammoniaque ;

3° Quand la lave est presque refroidie, des mofettes d'acide carbonique, provenant d'hydrocarbures brûlés, qui se dégagent extrêmement longtemps.

On peut donc distinguer trois phases, très importantes pour la genèse des gîtes métallifères : 1° chloro-fluorée, 2° sulfurée, 3° carburée.

Or, si par une voie toute différente, nous abordons l'examen direct des minéraux filoniens, nous retrouvons la preuve très vraisemblable que ces mêmes minéralisateurs sont intervenus en proportion variable suivant les cas. Ainsi, quand nous étudions le groupe stannifère, nous constatons que tous les si nombreux minéraux associés dans un filon de ce groupe ont pu être reproduits par l'intervention des chloro-fluorures et de la vapeur d'eau et de cette manière seulement. Des traces notables de ces éléments chlorurés et fluorés y subsistent. Et, si elles ne sont pas encore plus abondantes, on se l'explique bien parce que les chlorures, étant solubles, n'ont pu être fixés dans les filons que par une précipitation, où ils sont passés à l'état d'oxydes ou de sulfures. La liqueur chlorurée précipitée a, comme tous les produits solubles des réactions hydrothermales, continué son chemin vers le jour.

Ailleurs, dans le groupe des minerais sulfurés qui est de beaucoup prédominant, l'action des fumerolles sulfurées est encore plus nette. La plupart de ces précipitations métallifères s'expliqueront en supposant les métaux primitivement dissous, soit en chlorures, soit en sulfosels alcalins et précipités par l'action de l'hydrogène sulfuré, suivant la méthode couramment employée en analyse dans les laboratoires.

Il est également très probable que des dégagements hydrocarburés ont dû jouer un rôle, qui est moins net que les précédents parce que l'action des hydrocarbures brûlés en acide carbonique s'est surtout exercée après refroidissement, dans des conditions où peu de métaux restaient solubles et où ceux qui pouvaient encore se dissoudre étaient de ceux que l'on voit constamment remis en mouvement à la superficie. Néanmoins nous montrerons que les traces d'hydrocarbures apparaissent assez fréquemment même dans les filons profonds, que l'acide carbonique et les carbonates alcalins manifestent leur intervention dans bien des cristallisations intermédiaires entre la voie ignée et la voie hydrothermale, comme celles qui se rattachent au groupe des pegmatites, enfin que nombre de filons présentent des gangues carbonatées dans des conditions de profondeur rendant difficile l'hypothèse d'une altération ultérieure.

Nous trouvons donc, dans les fumerolles, un élément qui nous explique aisément bien des phénomènes de métallogénie difficiles ou impossibles à comprendre autrement, et il y a toutes raisons d'admettre leur action, que nous désignerons communément sous le nom de *pneumatolyse*.

Eaux thermales. — La part prise par les *eaux thermales* dans ces mêmes gisements est encore plus évidente. Là encore, nous ne croyons pas devoir reprendre ici une étude qui touche, il est vrai, de très près à la métallogénie, mais que nous avons essayé d'approfondir dans un ouvrage spécial¹ et dont nous aurons du reste à rappeler quelques conclusions dans un autre chapitre. En deux mots, on peut dire que les sources thermales actuelles ont des chances pour pouvoir se diviser en deux groupes : l'un qui s'est simplement échauffé par un circuit artésien et qui ne ramène donc au jour que les produits généralement banals dissous sur sa route dans les roches et terrains encaissants ; l'autre qui se relie aux phénomènes volcaniques et dont l'eau peut avoir en partie la même origine que celle dégagée dans les volcans eux-mêmes, être, comme on l'a dit, de l'eau « magmatique, neuve », ou « juvénile », arrivant pour la première fois au jour par emprunt à une réserve profonde, ou venant du moins de la refusion des roches, qui, elles-mêmes, la tiennent de conditions antérieures ignorées. La première catégorie de sources thermales n'a aucune chance pour avoir jamais produit de gîtes métallifères, à moins que le hasard l'ait amenée à circuler au contact d'un ancien filon et à en déplacer les minerais. La seconde, au contraire, semble nous offrir l'image de ce qui a dû se passer autrefois dans ces gisements filoniens que nous venons déjà de voir si intimement liés aux roches éruptives et contenant, d'autre part, des minéraux visiblement déposés par réaction aqueuse.

¹ 1897. L. DE LAUNAY. *Sources thermo-minérales*. Recherche, captage et aménagement Béranger, 1 vol. in-8° de 636 p.

A ce propos, nous remarquerons qu'on peut faire, pour les sources thermales, une observation analogue à celle que nous avons faite plus haut pour le volcanisme. Malgré le lien si vraisemblable des eaux thermales actuelles avec les anciennes eaux filoniennes, les sources thermales actuelles n'apportent au jour à peu près aucun métal¹. Si elles ne circulent pas, en le lessivant, dans un filon métallifère, les métaux qu'elles entraînent sont ceux-là seuls que nous nous sommes trouvés déjà énumérer à propos du volcanisme et, en premier lieu, le mercure. On peut en donner les deux mêmes explications que pour la pauvreté en métaux du volcanisme actuel : évolution des phénomènes, ou cristallisations profondes aujourd'hui invisibles à la surface. Il est infiniment vraisemblable que notre période marque, dans les phénomènes ignés internes producteurs de fumerolles métallisantes, un ralentissement par rapport à certaines périodes caractéristiques ; mais, en outre, il est logique qu'un produit, déposé en profondeur dans un filon hydrothermal, ne soit plus visible à l'épanchement, au griffon. Ce que nous voyons sortir de celui-ci, c'est ce qui était trop soluble pour se déposer. Et il pourrait se former, en ce moment, dans la profondeur des geysers d'Islande ou de Californie, de véritables filons métallifères que nous l'ignorons à la superficie.

L'idée que nous sommes amenés à nous faire des réactions ignées et hydrothermales en matière métallo-génique est la suivante. Nous nous représentons, dans une zone plus ou moins profonde de l'écorce terrestre et sous une pression plus ou moins grande, la mise en place de roches, généralement acides, plus rarement neutres ou basiques, accompagnée de phénomènes complexes, où s'établit, comme dans le volcanisme superficiel, le mélange des actions ignées et des actions hydrothermales : les premières d'abord prédominantes dans l'intérieur des masses ignées profondes, les secondes prenant ensuite le dessus à mesure qu'on s'en éloigne. Dans certains cas favorables, tenant, soit à leur composition primitive, soit à un concours de circonstances heureuses, ces roches ont pu, d'abord ségréger dans leur masse des métaux, puis dégager des fumerolles métalliques, plus ou moins mélangées de vapeur d'eau, qui se sont écartées tout autour dans toutes les fissures rencontrées. A un moment donné, la vapeur d'eau qu'elles renfermaient a pu se condenser ; ou bien il a pu y avoir rencontre d'autres eaux ayant une origine superficielle, sans qu'il soit bien aisé de démêler la part des deux phénomènes. A partir de ce moment, il a circulé, dans les fractures du terrain, des eaux chaudes, chargées de sels minéraux, que des circonstances à analyser plus tard ont amenées à se précipiter dans un ordre moyen inverse de leur solubilité. Il en est résulté des auréoles de cristallation successive autour de roches qui, elles-mêmes, suivant leur composition, suivant la structure déterminée par leurs propres conditions de solidification, étaient plus ou moins aptes à renfermer et à dégager tel ou tel métal. Pour chaque métal, la zone de cristallisation s'est trouvée ainsi localisée par un ensemble de conditions physico-chimiques, qui, en principe, n'ont pas per-

¹ Des listes, que l'on a données à ce propos, où tous les corps chimiques figurent comme présents dans les sources thermales, donnent une idée tout à fait inexacte du phénomène.

mis aux dépôts filoniens de parvenir jusqu'à la superficie, non plus que de s'étendre indéfiniment en profondeur. Les eaux résiduelles filoniennes, dont les métaux s'étaient trouvés ainsi séparés, ont dû alors continuer à arriver jusqu'au jour sous la forme d'eaux volcaniques ou geysériennes ; mais il est probable que, même aux époques anciennes de grande activité filonienne, elles étaient, en atteignant la surface, à peu près stériles en métaux, comme le sont les sources thermales actuelles.

Action chimique des eaux froides. — Remises en mouvement. — Le groupe suivant de réactions métallogéniques, ayant leur équivalent dans les phénomènes actuels, que nous devons maintenant examiner, ce sont les réactions dissolvantes, puis précipitantes, des *eaux froides*. A ce groupe se rattache toute la catégorie des phénomènes qui ont pu concentrer les métaux d'un gisement antérieur dans sa zone superficielle, ou ceux qui ont déplacé d'avantage les minerais dissous pour aller les concentrer dans un bassin de sédimentation plus ou moins éloigné. Le phénomène, qui prend des éléments métalliques disséminés dans une roche pour en faire un gisement utilisable, est ce qu'on a appelé la *sécrétion latérale* dans le cas présumé où l'origine des métaux filoniens se serait composée de simples traces disséminées dans une roche à peu près quelconque. Ce cas étant pour nous tout à fait exceptionnel, nous appellerons plutôt les phénomènes du même genre qui, à notre avis, ont porté uniquement pour les enrichir sur des gisements déjà antérieurement formés, des *remises en mouvement*.

A cet égard, les observations actuelles sont nombreuses, et nous assistons de tous côtés à des remises en mouvement produites presque sous nos yeux, dont l'effet, mal interprété, a pu souvent induire grossièrement en erreur sur l'origine de certains gites métallifères.

Le fait essentiel, dans cet ordre d'idées, est la différence manifeste entre les réactions pratiquement constatées en géologie et les réactions théoriquement admises en chimie. Dans le premier cas interviennent, pendant des temps très longs, des dissolutions très étendues, où les corps considérés sont à l'état de simples traces, tandis que, dans le second, on envisage plus aisément et plus volontiers l'action rapide de dissolutions concentrées, en accélérant les vitesses au moyen de catalyseurs. Si l'on ajoute qu'en géologie on ne connaît guère l'eau pure des chimistes, mais que toutes les eaux agissantes sont au moins chargées d'acide carbonique, de chlorures, de sulfates, nitrates, etc., on s'explique certains paradoxes apparents, qui offrent pour nous un grand intérêt.

Je renvoie à un chapitre ultérieur l'étude très importante de ces altérations superficielles et remises en mouvement. Contentons-nous d'observer que nous constatons sans cesse la dissolution, dans l'eau entendue au sens géologique, de la silice, de la fluorine, de la barytine, des sulfures de plomb, de zinc, etc. : voire même de la cassitérite, de l'or, probablement du platine, etc. C'est ainsi que nous trouvons, par des effets de remise en mouvement évidents, des corps de ce genre concentrés sur des produits organisés, des ossements, des débris végétaux, des bois de mines, des outils antiques abandonnés dans d'anciens travaux. Et ces derniers cas sont particulièrement suggestifs, puisqu'il est impossible de supposer que la forma-

tion du minerai dans une mine ait été postérieure à l'exploitation qui allait le chercher. A plus forte raison, ces déplacements se généralisent-ils quand il s'agit de corps aisément solubles, comme le cinabre, la pyrite de fer, les sels de cuivre.

Nous constatons encore, toujours dans des conditions actuelles, les transformations de roches ou minerais sous l'action de l'air humide : par exemple, le développement d'oligiste dans un bloc de pyrite exposé au vent de mer, le suintement du manganèse sous forme de dendrites dans un tas de cailloux à teneur en silicate de manganèse presque insignifiante¹. Au laboratoire, on montre que l'oxyde produit par le contact d'une eau aérée n'est jamais plus oxydé que $Mn^{2}O^{3}$. La braunite est, au contraire, une substance rare et accessoire dans la nature, tandis que les dendrites de psilomélane (bioxyde hydraté) se forment de tous côtés à la surface de tous les terrains. Citons encore les cristallisations connues de minerais métalliques étudiées par Daubrée sur des monnaies ou des objets antiques mis pendant plusieurs siècles en contact avec un griffon thermal faiblement minéralisé, etc.

Nous insisterons également sur ce fait capital qu'un élément minéral quelconque, une fois produit, continue à vivre, à évoluer spontanément en tendant vers une forme plus stable, de sorte que nous ne trouvons peut-être jamais nos remplissages filoniens et nos roches tels qu'ils ont cristallisé au début.

Quant aux dissolutions superficielles avec transport à distance, elles aboutissent tous les jours à des dépôts minéraux ou métallifères dans les eaux d'un lac ou d'une mer. Nous reviendrons, à propos des gisements salins, sur les conditions d'évaporation bien connues d'une eau de mer. Remarquons seulement de suite qu'on est là dans les cas très complexes étudiés par Van't Hoff, où des sels divers en dissolution simultanée s'influencent les uns les autres.

A ce groupe de phénomènes se rattachent encore : dans les lacs, les minerais de fer dits des marais ; dans les mers, les nodules manganésifères des grandes profondeurs, sur lesquels nous aurons à revenir.

Action mécanique des eaux superficielles. — Les eaux superficielles ont pu encore agir *mécaniquement* sur des minerais pour les classer et concentrer. C'est l'origine des gisements détritiques, ou alluvionnaires, particulièrement des placers, auxquels nous consacrerons bientôt un chapitre spécial.

Distinction entre les gisements de formation primaire ou secondaire. — Nous voyons donc, en résumé, par ce seul premier aperçu sommaire, quelles sont les grandes divisions de notre sujet et quels points principaux nous aurons à examiner. Tout d'abord, nous distinguerons deux groupes essentiels : les gisements de *formation primaire*, qui sont ceux où nous retrouvons les minerais dans les conditions mêmes où ils se sont déposés primitivement et sans modification ultérieure, autant du moins qu'une telle condition peut être réalisable dans la nature. Ce

¹ Voir, à ce sujet : *Métallogénie de l'Italie*, p. 85, et *Note sur la Métallogénie des blends*, B. S. G. F., 5 déc. 1910.

seront nos gîtes d'inclusions, de ségrégation, de départ immédiat, de contact, nos filons, nos imprégnations, nos substitutions. Après quoi, nous devrons passer aux remaniements qui ont déterminé, par remise en mouvement dans le gisement même ou transport à distance, les gisements de *formation secondaire*, sédiments métallifères, alluvions, etc.

Nos principes de métallogénie se termineront logiquement par des considérations générales, indépendantes des catégories précédentes, sur la localisation des minerais dans le temps et dans l'espace : d'abord sur l'âge des gîtes métallifères et sur les périodes de superintensité métallogénique, où les minerais ont été spécialement réalisés ; puis sur la répartition géographique des gisements et sur les types géologiques régionaux propices à leur développement.

Mais, auparavant, il faut encore ajouter quelques observations, qui s'appliquent à l'ensemble des gisements de formation primaire et dont la place naturelle est donc ici : sur les lois de la métallurgie naturelle ; le rôle des traces en métallogénie ; le rôle de l'eau dans les magmas profonds ; les conditions générales de la cristallisation (retour en profondeur ou dislocations disjonctives).

LOIS DE LA MÉTALLURGIE NATURELLE

L'opération naturelle, qui tend à extraire et à concentrer des traces métalliques disséminées dans un magma igné, que ce soit pendant sa fusion ou après son refroidissement, qu'il y ait simple intervention de fusion ou dissolution aqueuse, est, en somme, une réaction métallurgique, que nous avons déjà eu l'occasion de comparer à celles de nos usines et qui poursuit implicitement le même but. Dans tous les cas, on part d'une solution complexe, solide ou liquide, pour en isoler un ou plusieurs éléments, devenus par là utilisables. Les facteurs qui interviennent sont, d'après les divisions ordinairement admises, d'ordre, soit physique (température, pression), soit électrochimique ou chimique (dissolutions, réactions mutuelles des éléments, précipitations).

Dans l'ordre simplement physique, les différences de température, allant jusqu'à 3 000 ou 3 500 degrés¹ au-dessus de ce que nous appelons la normale, ont pu intervenir au début de l'histoire terrestre. Plus tard, le champ d'action s'est restreint, et il ne semble pas qu'il ait été jamais réalisé des températures supérieures à celles que nous obtenons dans nos foyers. Pour les fumerolles, les températures se maintiennent, nous l'avons dit, au-dessous de 500 degrés et souvent même au-dessous de 100 degrés. Dans le champ des pressions, nous ignorons, quand il s'agit de magmas à structure granitique, quelles limites ont pu être atteintes. Nous arrivons facilement, en pétrographie, à constater que, suivant la dimension du vide interne où se sont accomplies les cristallisations, celles-ci ont pu devenir plus ou moins homogènes, subissant plus ou moins l'influence des parois, qui exerce, soit par simple action refroidissante, soit même par des phénomènes d'endomorphose, un trouble dans

¹ Température de l'arc électrique.

les réactions. La même intervention se manifeste en métallogénie pour les ségrégations, les dépôts immédiats et les gîtes de contact.

Parmi les facteurs chimiques, nous aurons à distinguer le cas des solutions solides, qui est celui des réactions purement ignées et celui des solutions liquides, qui se réalise dans les phénomènes filoniens hydrothermaux. Nous insisterons bientôt à cet égard sur le rôle des traces. Quand nous étudierons plus tard les minerais de formation secondaire, nous aurons également à considérer l'influence de l'activité organique, manifestée surtout par une catégorie spéciale de réactions chimiques.

Les combinaisons de minéraux oxydés, et surtout de silicates, qui constituent les roches et leurs ségrégations, rentrent dans ce qu'on appelle des solutions solides, c'est-à-dire des mélanges à proportions variables et non plus à proportions définies. L'association de plusieurs minerais ou gangues précipités simultanément dans une même phase solide d'un remplissage filonien leur est, en quelque mesure, assimilable. Quand les conditions extérieures se sont modifiées, un ou plusieurs de ces minéraux ont pu se refondre ou se redissoudre.

Cycles de cristallisation. — De tous ces phénomènes résultent, pour les corps simples et pour les composés, une série de cycles, qui, suivant les changements successifs des conditions de milieu, les amènent tour à tour à tel groupement, devenu plus stable dans les conditions réalisées. Pour chaque corps en particulier nous attachons une grande importance à suivre l'évolution de ces cycles, souvent compliqués, et à voir quelles modifications extérieures successives peuvent transformer un minéral en un autre. Remarquons, à ce propos, que nous considérons volontiers comme plus stables d'une façon absolue les combinaisons et les formes d'équilibre qui, dans les conditions normalement réalisées à la surface de la Terre, résistent le mieux aux agents extérieurs. Mais ces conditions, dites normales, qui ont pour nous un intérêt de premier ordre parce que ce sont celles au milieu desquelles nous vivons et agissons, sont, en réalité, purement accidentelles. Et c'est une erreur que de vouloir, à toute force, expliquer tout ce qui a pu se passer autrefois sur la Terre par les conditions présentes. Si on remonte dans le passé, l'état normal de la Terre n'est pas, contrairement à l'apparence, l'état de consolidation refroidie, mais l'état igné. En métallogénie, c'est encore, pour nous, la prolongation locale ou la reproduction accidentelle de cet état igné qui constitue le cas normal, d'où commencent par provenir toutes nos concentrations de minerais. Les minerais ne sont, en dernière analyse, qu'un cas particulier des roches ignées, plus ou moins modifié par les réactions ultérieures; et l'étude de ces roches ignées est le fondement nécessaire de la métallogénie.

ROLE DES TRACES EN MÉTALLOGÉNIE

Quand, — ce qui forme essentiellement l'opération constitutive d'un gisement métallifère — une solution très complexe a été amenée à précipiter, à laisser cristalliser un ou plusieurs de ses éléments utiles, il y a

eu production d'une phase solide qui, dans la pratique, est presque toujours elle-même complexe. Pour une étude où nous prétendons remonter de ce précipité aux conditions de son solvant, aucun des éléments qui entrent dans cette phase n'est négligeable. C'est à cet égard qu'il y a lieu d'envisager le rôle des « traces étrangères », trop souvent négligées dans la composition des minéraux ou dans le mélange, plus varié, qui remplit un gisement. On s'attache avec raison, en minéralogie ou en physique, à considérer des minéraux aussi purs que possible et aussi complètement séparés que possible des minéraux voisins. Si l'on veut savoir comment l'ensemble minéralogique s'est formé, il n'est pas moins utile de connaître les plus minimes indices de substances, réputées étrangères, qui y apparaissent. C'est dans cet ordre d'idées que j'ai fait, avec G. Urbain, quelques travaux sur les blends, dont il sera question ailleurs¹, à l'occasion des gisements filoniens où ces minerais ont été recueillis.

Chacun connaît aujourd'hui le rôle des infiniment petits dans les phénomènes organiques, l'influence exercée par des proportions infimes de substances étrangères dans les alliages métalliques. Plus généralement, on s'est rendu compte en chimie qu'on n'avait pas le droit d'isoler de leur milieu un ou deux corps pour envisager leurs réactions, mais qu'il y avait solidarité entre toutes les parties et que cette solidarité s'étendait même à des corps représentés en proportions très faibles par rapport au milieu ambiant. Il est, en effet, logique que, dans des phénomènes où interviennent les termes les plus ténus de la constitution moléculaire, les éléments très divisés soient particulièrement capables d'intervenir ; d'où le rôle probable, non seulement des traces, mais aussi des états de division extrême déterminés par ce qu'on a appelé l'état naissant, par les dialyses, etc.

En minéralogie, on a souvent eu, comme dans l'ancienne chimie, une tendance à simplifier les formules en se bornant aux corps principaux et regardant les autres comme des impuretés. On a cependant constaté de bonne heure que, dans un minerai déterminé, il pouvait y avoir substitution moléculaire d'un élément isomorphe, en quantités même infinitésimales, ou, en poussant plus loin, d'un métal remplaçant partiellement un autre métal du même groupe. D'où les cas bien connus de l'*isomorphisme*, en vertu desquels des molécules, non identiques par leur nature, peuvent coexister dans un même cristal, mais non sans entraîner certaines modifications, réputées accessoires. L'isomorphisme, qui n'est pas seulement une curiosité exceptionnelle mais un cas normal, fait en quelque sorte la contrepartie du dimorphisme, par lequel une même substance peut prendre deux ou plusieurs formes cristallisées incompatibles.

On a cru d'abord que les corps isomorphes devaient avoir à la fois même composition chimique, même forme cristalline et mêmes propriétés physiques. Ainsi les carbonates de chaux, strontiane, baryte et plomb CaCO_3 , etc. (aragonite, strontianite, whitérite, cérusite) tous cristallisés en prismes orthorombiques d'angle presque identique ($116^\circ 10$ à $117^\circ 48$) et de mêmes clivages, ou encore les carbonates rhomboédriques de chaux, chaux et magnésie, magnésie, manganèse, fer, zinc (calcite, dolomic, gio-

¹ Page 158 à 162.

bertite, dialogite, sidérose, smithsonite), ou encore la série des spinelles octaédriques, des chloro-phosphates hexagonaux.

La première notion des modifications réalisées par des substitutions d'éléments chimiques les uns aux autres dans cet édifice si remarquablement équilibré qui est l'édifice cristallin, a été ainsi donnée par l'*isomorphisme proprement dit* de Mitscherlich : substitution de molécules cristallines presque identiques par leur composition chimique et par leurs propriétés cristallines et optiques, comme les carbonates précédents.

Puis on a reconnu l'isomorphisme de corps, tels que le chlorate de potasse et le manganate, tels que la calcite et la nitratine, qui n'ont pas d'équivalence chimique, mais renferment des nombres égaux d'atomes semblables.

Il y a des éléments isomorphes qui forment les groupes suivants : (Li, Na, K), (Gl, Mg, Zn), (Ca, Ba, Sr, Pb), (Al, Fe, Mn, Cr), (Ag, Cu), (Mg, Zn, Fe, Mn, Co, Ni), etc.

L'isomorphisme amènera, par exemple, à reconnaître qu'un périclote olivine est formé d'un mélange de Mg^2SiO^4 et Fe^2SiO^4 en proportions quelconques ; ou qu'une calcite peut passer à la sidérose par l'intermédiaire de toute une série de calcites ferrifères, ou spaths brunissants ; ou encore que, dans un grenat grossulaire, dont le terme le plus simple est un silicate d'alumine et de chaux $(CaO)^6, (Al^2O^3)^2 (SiO^2)^6$, la formule plus générale est $(RO)^6 (R^2O^3)^2 (SiO^2)^6$: le protoxyde pouvant être du calcium, du fer ou du manganèse ; le sesquioxyde, du fer ou de l'aluminium. Il faut ici que les atomes mêmes, et non plus seulement les molécules composées, se substituent l'un à l'autre.

On a été alors amené à l'idée de l'*isomorphisme de masse*. Dans la molécule même, la symétrie et le volume sont peu influencés par la substitution d'un atome à un autre qui modifie peu l'équilibre. Il n'y a pas identité absolue entre les éléments constituants d'une espèce minérale, mais approximation, et tolérance.

Il faut seulement que les molécules composantes soient analogues, non en ce qui concerne l'espèce même des atomes, mais pour leur degré de symétrie et leur volume moléculaire. Plus ces volumes moléculaires approchent de l'égalité et plus l'isomorphisme est parfait. Ainsi les carbonates de chaux et de magnésie, assez différents, s'unissent seulement dans une certaine proportion ; les carbonates de fer et de magnésie, plus semblables, s'unissent dans des proportions très variables.

Enfin, parmi les diverses proportions, certaines prédominent, comme si l'existence de rapports simples entre les éléments constituants donnait à l'édifice cristallin une plus grande stabilité.

Quand il intervient ainsi des éléments étrangers divers dans la constitution d'un même cristal, qu'il y ait ou non isomorphisme, on a souvent admis que les propriétés du mélange étaient une sorte de moyenne arithmétique entre les propriétés élémentaires. C'est peu exact, et telle trace peut exercer une influence prédominante sur tout le mélange. Ainsi, parmi les cas qui nous occuperont spécialement plus tard, la reproduction du saphir avec sa coloration n'a pu être obtenue d'abord qu'en ajoutant un peu de chaux ou de magnésie à l'alumine. De même, on peut se demander si l'impossibilité où l'on reste

de reproduire pratiquement le diamant ne tient pas, en partie, à ce qu'on s'obstine à vouloir faire cristalliser le carbone pur, indépendamment des corps étrangers, toujours présents dans les diamants naturels. Nous verrons même à propos des blends¹ que ces minerais renferment des métaux très différents suivant les conditions de milieu où elles se sont formées, et ces corps étrangers exercent une influence sur leur mode de cristallisation. Peut-être, si on cherchait davantage dans cette voie, trouverait-on une explication à un fait très intéressant pour nos études : c'est la différence de forme cristalline dominante que présentent bien des minéraux suivant le type du gisement où on les a recueillis.

RÔLE DE L'EAU DANS LES MAGMAS PROFONDS

La part prépondérante prise par l'eau dans les cristallisations hydrothermales sera suffisamment mise en évidence. Il n'est peut-être pas inutile d'insister également sur la part que cet élément singulier, si différent des autres presque à tous égards, a prise dans les réactions simplement pétrographiques dont résultent les inclusions et les ségrégations. Divers expérimentateurs ont montré la présence générale de l'eau dans les fusions profondes de roches : présence qui peut être admise comme un fait malgré une théorie récente du volcanisme anhydre, dans laquelle on suppose l'eau même des éruptions volcaniques introduite du dehors. Or, d'après Arrhénius², l'eau, en profondeur et à haute température, agit comme un acide relativement fort pour se substituer à la silice et mettre en liberté des bases qui, à la faveur de la mobilité donnée au magma par sa présence, se combinent en silicates avec la silice déplacée par la même réaction. A mesure que les roches se refroidissent pour une cause quelconque, l'eau devient un acide de plus en plus faible ; la silice peut à son tour expulser des hydrates et dégager de nouveau de la vapeur d'eau. Le phénomène est notamment susceptible de se produire dans l'arrivée au jour des laves. Il est très possible que la première réaction, celle où la silice se trouve déplacée, ait contribué, dans le phénomène filonien, à la production de dissolutions siliceuses précipitées en quartz un peu plus loin.

CONDITIONS GÉNÉRALES DE LA MÉTALLISATION

1° RETOUR EN PROFONDEUR : 2° DISLOCATIONS DISJONCTIVES

Les conditions générales de la métallisation rentrent, pour la plupart, dans une conclusion d'ensemble, où se trouvent groupés, à la fois, les gisements, tels que les ségrégations, et imprégnations diffuses en rapport avec des actions ignées, et les gisements hydrothermaux filoniens. Les principaux phénomènes, qui ont déterminé les métallisations, peuvent se

¹ Page 458.

² *Geol. Fören. Forh.*, Stockholm, 1900. — Voir encore, sur ces questions théoriques, outre les travaux de M. A. Gautier rappelés plus haut : MOROZEWICZ, *Experimentelle Untersuchungen über die Bildung der Minerale im Magma* (Tschermaks Min. petrogr. Mitth., t. 18, 1898).

résumer en deux mots : retour en profondeur et dislocations disjonctives.

1° Le *Retour en profondeur* d'une série sédimentaire, par l'effet de plissements orogéniques, a facilité l'introduction de magmas ignés renfermant des minerais sous forme d'inclusions et de ségrégations, ou en dégageant à leur contact presque immédiat à l'état de fumerolles qui ont formé des imprégnations diffuses. La métallisation apparaît alors souvent connexe du métamorphisme régional et elle affecte, en moyenne, les mêmes zones.

Si nous trouvons aujourd'hui ces gisements de profondeur à la surface, c'est qu'ils ont été mis à jour par l'érosion, ou relevés par un mouvement tectonique. Mais, puisque nous les voyons souvent englobés dans des sédiments qui ont commencé par être superficiels, et qui ont été métamorphosés, il faut que ceux-ci aient subi auparavant le retour en profondeur dont il est ici question.

2° Dans une zone plus voisine de la superficie, les *Dislocations disjonctives* d'un compartiment qui n'est plus susceptible de se plisser, ont amené l'ouverture de fractures pouvant jouer le rôle de failles et, dans de telles fissures, elles ont provoqué la cristallisation de sels provenant d'eaux thermales, également minéralisées en profondeur par un départ éruptif, mais ayant pu s'écarter davantage de ce magma, monter davantage vers la surface, sans cependant, à notre avis, l'atteindre d'ordinaire. Les métallisations peuvent, dès lors, porter, non seulement sur des sédiments, mais aussi sur des roches cristallines déjà solidifiées, fût-ce les plus compactes, du moment qu'elles ont été disjointes. Ce type filonien paraît correspondre en moyenne à une profondeur de cristallisation moindre que les ségrégations ignées ou les imprégnations diffuses, quoique nous venions de considérer une certaine profondeur comme nécessaire. Les venues de métaux, comme les manifestations pétrographiques dont elles sont le corollaire, y ont été d'ordinaire provoquées par le jeu relatif dans le sens vertical de compartiments juxtaposés ayant déterminé, soit des refusions internes, soit tout au moins des déplacements des magmas fondus. Suivant que la production des minerais se rattache à un plissement tangentiel ou à un affaissement vertical, on voit prédominer : soit, dans le premier cas, les imprégnations de profondeur; soit, dans le second, les remplissages de failles.

On a une image de ces deux modes de métallisation, ou plutôt d'ouverture de vides destinés à être métallisés, en comparant ce qui se passe lorsqu'on essaie de rompre, d'une part, un schiste flexible ou un agrégat instable, dont les plans de stratification et les surfaces de joints facilitent la fissuration qui a tendance à les suivre et, d'autre part, une masse solide homogène, qui peut du reste être composée de fragments complètement ressoudés.

Dans les deux cas, nous arrivons, pour les métallisations, à une idée analogue à celle qui domine aujourd'hui l'orogénie. De même que les grandes chaînes montagneuses se sont réalisées en profondeur pour surgir après coup, de même, et en dépit de l'illusion que peut produire le volcanisme par sa violence extérieure, les grandes formations de minerais et de roches cristallines doivent être des manifestations *profondes* ou tout au moins *demi-profondes*.

L'histoire d'un bloc de terrains fracturé, où nous trouvons aujourd'hui des minerais, que la forme de ceux-ci soit celle d'une ségrégation, d'une imprégnation diffuse ou d'un filon incrusté en profondeur, comporte presque toujours une succession de mouvements ascendants et descendants, de ramenées à la surface et de remises en profondeur, dont les gites métallifères englobés portent actuellement l'empreinte. Il suffit, pour s'en rendre compte, d'envisager, sur la coupe des terrains dans une telle région métallifère : d'un côté, les terrains métamorphiques et les intrusions ignées qui accusent la profondeur ; de l'autre, les lacunes suivies de transgressions qui montrent le retour momentané à la surface. Cette sorte de jeu de bascule, là où il s'est produit, — ce qui est généralement le cas pour les zones disloquées à manifestations intrusives filoniennes, — a puissamment contribué à déterminer la mobilité des éléments chimiques et, par suite, leur groupement nouveau, leur concentration métallogénique.

Il faut bien, en effet, penser que, pour une concentration minérale, la condition préjudicielle a nécessairement toujours été la mobilité des éléments. Dans les réactions ignées que nous examinerons d'abord, cette mobilité a été assurée par le simple processus de la liquation ou de l'écoulement des corps solides, puis par l'intervention presque certaine de la vapeur d'eau, enfin, accessoirement, par la combinaison avec les métalloïdes. Ailleurs, dans les filons concrétionnés, le même rôle sera attribuable à des dissolutions ou, superficiellement, dans les alluvions métallifères à de simples agents de transport mécanique.

CHAPITRE IV

GISEMENTS DE FORMATION PRIMAIRE. — LES RÉACTIONS IGNÉES EN MÉTALLOGÉNIE

GITES D'INCLUSIONS, DE SÉGRÉGATION MAGMATIQUE, DE DÉPART IMMÉDIAT ET DE CONTACT

Nous avons admis que les gites métallifères étaient produits par un emprunt plus ou moins direct aux roches ignées. Laissant de côté pour les chapitres VI à X, les gisements hydrothermaux filoniens proprement dits, où le départ a été particulièrement accentué et lointain, nous allons examiner, dans celui-ci, tous les cas où paraissent avoir dominé les réactions ignées, en les étudiant dans leur ordre logique, suivant leur écartement plus ou moins accentué de la roche mère : A, inclusions ; B, ségrégations magmatiques oxydées ; C, Gites de départ immédiat ou de ségrégation périphérique sulfurée ; D, Gites de contact du type Banat.

Le chapitre suivant V sera consacré aux amas pyriteux et imprégnations diffuses de profondeur.

Pour tous ces gisements, nous resterons dans le cas d'une métallurgie ignée à éléments volatils, d'abord très restreints, puis, à mesure que nous avancerons, progressivement développés, et nous pourrons comparer les conditions de cristallisation qui ont été réalisées alors naturellement pour nos roches, à celles que nous obtenons volontairement dans nos fourneaux. L'étude de ces dernières réactions industrielles montre vite combien il suffit de modifier peu, soit le lit de fusion, soit les conditions de l'expérience, la température, la conduite de l'air soufflé, le refroidissement par les tuyères, l'écoulement des scories, etc., pour obtenir des résultats tout à fait différents. Il n'est donc pas surprenant, indépendamment même de ce que nous avons dit plus haut sur la possibilité initiale de bouffées métalliques internes, que chaque province métallogénique ait son type spécial et qu'on puisse seulement constater, comme nous le verrons au chapitre XIII, un air de famille entre provinces tectoniques, répondant à un ensemble général de conditions analogues.

Dans cette métallurgie interne, le lit de fusion primitif nous échappe, ou ne saurait être qu'imparfaitement reconstitué. Mais nous pouvons un peu mieux nous représenter le milieu, où s'est réalisée l'opération. Ce milieu paraît, dans la plupart des cas, avoir été un milieu de profondeur, où, sans doute, on n'a pas besoin de faire intervenir les énormes pressions que l'on a parfois supposées, mais où, néanmoins, cette pression a dû être suffisante et assez uniformément répartie pour permettre au bain igné de conserver une certaine homogénéité.

Par là, comme nous l'avons fait remarquer plus haut, d'une façon générale, les gisements directement dus à des réactions ignées se caractérisent, pour la plupart, comme des gisements d'origine profonde. La condition est ici beaucoup plus rigoureuse que pour les filons.

.1. — GITES D'INCLUSIONS

Caractères généraux des inclusions. — Les gites d'inclusions sont, pour nous, ceux où un minéral utilisable se présente dans une roche ignée au même titre que les autres éléments constitutifs. Les inclusions métallifères sont, par suite, dans la plupart des cas, une forme de gisement plus théorique que pratique. Il faudra, en effet, qu'une substance ait une bien grande valeur pour qu'on soit conduit à en chercher des éléments disséminés dans toute une masse rocheuse, avec une teneur nécessairement très médiocre. Cependant, outre l'intérêt que de tels gisements présentent pour nous en nous montrant le point de départ de toutes les concentrations ultérieures, et d'abord des ségrégations, on a été amené, dans un nombre de cas plus grand qu'on ne le croirait d'abord, à exploiter de tels gites, lorsque la roche encaissante avait au moins subi une désagrégation qui permettait d'en extraire un minéral plus dur par un lavage ou, à plus forte raison, quand une préparation mécanique naturelle avait commencé par rassembler ces éléments d'inclusions dans des sables alluvionnaires, le long d'un cours d'eau, sur une plage, etc. Nous aurons à en citer des cas pour le diamant, les diverses gemmes, l'apatite, la magnétite, la cassitérite, l'or, le platine, etc. Il est probable que, dans les métallurgies primitives, les gisements de fer, d'étain et peut-être même de cuivre, se sont présentés sous cette forme, qui est encore celle sous laquelle nous recueillons exclusivement le platine.

Si nous envisageons la généralité du phénomène, nous pouvons, de prime abord, nous attendre à trouver, parmi les éléments constitutifs des roches, ou *inclusions*, outre des minéraux utiles comme le diamant, l'apatite, etc., dont c'est souvent la place normale, un grand nombre de minerais métalliques. Il n'y a pas, en effet, entre les éléments banals des roches et ces minerais, une coupure naturelle semblable à celle que nous tendons à établir en pratique d'après leur valeur industrielle et nous constatons, que les éléments homologues du fer (lui-même constant dans toutes nos roches), tels que le chrome, le nickel, le cobalt, le manganèse, peuvent, dans une certaine mesure, se substituer à celui-ci dans les minéraux oxydés ou silicatés, de même que le magnésium ou le titane.

Généralement les métaux, qui subsistent ainsi dans une roche à l'état d'inclusions, sont ceux qui n'ont pas pu être entraînés par les éléments volatils : soit qu'ils aient cristallisé à l'état natif, comme le platine, comme le fer natif d'Ovifak, ou comme le nickel natif dans les péridotites de Nouvelle-Zélande; soit qu'ils aient été directement oxydés, comme la magnétite; soit qu'ils aient formé des silicates; soit encore que leur chlorure ait été immédiatement précipité par la vapeur d'eau, ainsi que cela a dû se produire pour l'étain.

Les métaux sulfurables peuvent également laisser des traces dans le

magma scoriacé et surtout se concentrer à sa périphérie (pyrite, chalcopyrite, pyrrhotine nickelifère et cuprifère, etc.), bien qu'ils aient, d'ordinaire, subi un départ plus accentué. Dans ces deux derniers cas, on voit que l'intervention des minéralisateurs commence à se manifester.

Il peut y avoir des inclusions dans les roches acides ou neutres, comme dans les roches basiques ; elles ne sont pas du même ordre. Les premières accusent souvent la présence de chlorures et d'oxydants en excès ; ce seront, par exemple, l'étain en cassitérite, ou le fer en oligiste, avec association possible d'un minéral chloruré comme l'apatite ; ce sont encore les roches à apatite, à rubis, à saphir, à grenat. Les secondes témoignent d'une atmosphère réductrice, où les oxydes sont restés incomplets (métaux natifs protoxydes ou oxydes neutres).

Dans l'un comme dans l'autre groupe, nous rencontrerons des pyrites, chalcopyrites, etc.

Inclusions des roches basiques. — Si nous commençons par les roches basiques, ce sont déjà des gites d'inclusions que ces traces de chrome, de nickel, de cuivre, de cobalt, de bismuth, etc., reconnues par les chimistes dans les micas, les pyroxènes, les hornblendes de certaines roches et c'est même peut-être la forme la plus typique des inclusions proprement dites. La moyenne des roches contient près de 0,01 p. 100 de chrome et 0,005 de nickel, soit 50 à 100 grammes de chacun par mètre cube. Dans les roches basiques, on a parfois, en même temps, 10 à 20 grammes de cuivre à l'état de traces sulfureuses¹. Il faut voir là, selon nous, les résidus de l'opération métallurgique, des sortes de grenailles restées incorporées dans la scorie. On remarquera, néanmoins, que, pour chaque kilomètre cube de roches cristallines détruites par l'érosion à la suite d'un plissement, 10 grammes par mètre cube représentent 10 000 tonnes de métal mis en liberté : considération qui ne saurait être négligée dans la théorie des gites sédimentaires.

Ce rôle des inclusions est encore bien plus marqué pour la magnétite : élément presque normal dans la constitution des roches basiques et souvent en quantités assez fortes pour que les métallurgies primitives l'aient extrait par un triage, surtout après une première préparation mécanique naturelle dans des sables d'alluvions et pour qu'aujourd'hui on recommence parfois à chercher, sur les côtes, de semblables sables ferrifères.

Avec la magnétite s'associe en certains points, mais surtout après concentration par ségrégation ou départ, de la chalcopyrite.

¹ D'après des analyses de KILLING et de SANDBERGER, un mètre cube de gneiss pris dans la Forêt-Noire aurait contenu, en moyenne, 100 à 200 grammes de cuivre avec une proportion appréciable de plomb, argent, etc. Ces chiffres sont, d'après des travaux plus récents, tout à fait inexacts. STELZNER n'a rien retrouvé de semblable. Des études du même genre ont été faites souvent par les géologues américains. Voir BISCOFF. *Chemical and physical geology*, t. 3, p. 548. — 1877. SANDBERGER. *Zur Theorie der Bildung der Erzgängen* (Berg u. Huttenm. Z.) et 1880. *Ueber die Bildung der Erzgängen mittelst Auslaugung des Nebengesteines* (Z. d. D. geol. Ges) ; cf *ibid.*, p. 550. — EMMONS : *Leadville* p. 574. — 1898. J. R. DON. *The genesis of cert. aurif. lodes* (Tr. Am. I. M. E, t. 27, p. 564-688).

Ce sont encore des inclusions passant à des ségrégations que les noyaux de fer natif dans les enclaves de dolérite au milieu du basalte d'Ovifak, et dans la roche de Cañon Diabolo, ou les fers nickelifères dans la roche à olivine d'Awarua, en Nouvelle-Zélande.

Un exemple très typique de ces inclusions en roches basiques est fourni par la Nouvelle-Calédonie, où les minerais de nickel, avec cobalt, chrome et manganèse, sont englobés dans des péridotites serpentinisées, et constituent, sous leur forme primitive, avant l'altération de surface où ils se sont concentrés, un véritable gîte d'inclusions, tandis que le gîte industriel représente le type même des sécrétions latérales secondaires.

Ces péridotites, composées de péridot et d'un pyroxène orthorhombique exempt de chaux (enstatite ou bronzite), renferment, d'une façon constante, du nickel et du cobalt, englobés dans ces minéraux (proportion moyenne des deux oxydes : 1 kg. à la tonne), avec du fer chromé en grains (1 à 2 kg. à la tonne) et du pyroxène. La roche fraîche contient 49 p. 100 de magnésie, que l'altération superficielle fait tomber à 39 p. 100. Localement, il existe des concentrations d'olivine avec fer chromé et sans pyroxène (dunites). Ce sont de telles roches, qui, par un métamorphisme tout superficiel, où a disparu une grande partie de la magnésie, ont donné les gisements de nickel, cobalt, chrome, etc. exploités dans cette colonie.

C'est également dans de véritables gîtes d'inclusions que l'on trouve le platine. Dans les péridotites de l'Oural, qui forment son grand gisement industriel, ce métal précieux est tellement disséminé que, pour le rendre utilisable, il a fallu sa longue préparation mécanique dans les alluvions et c'est seulement dans ces toutes dernières années qu'on est arrivé à trouver en place une petite veine de péridotite tenant localement 23 grammes de métal à la tonne.

Pour le cuivre, j'ai déjà mentionné les faibles teneurs en métal rencontrées parfois à l'analyse, sans que le minéral cuprifère se distingue aisément. Mais on peut également observer de la chalcopirite en inclusions, comme on trouve de la pyrite ou de la pyrrotine. Nous en citerons tout à l'heure des exemples pour les roches acides.

On connaît diverses roches basiques cuprifères dans toute leur masse : des gabbros ou norites (types du Canada et de Scandinavie) ; des diabases microgrenues et des mélaphyres (Nassau, Bourgas en Bulgarie, Dchida en Transbaïkalie, Yunnan, Madagascar, Lac Supérieur). Dans la plupart de ces cas, que nous examinerons ultérieurement, on peut se demander s'il n'y a pas eu introduction postérieure. Néanmoins, l'existence antérieure d'une certaine teneur en cuivre dans toute la roche reste bien vraisemblable, d'autant plus que les scories de nos usines à cuivre renferment parfois de la chalcopirite cristallisée.

Enfin, ce sont des cas tout à fait typiques d'inclusions minérales dans des roches basiques que les cheminées diamantifères du Cap avec leurs péridotites, dans lesquelles on trouve en moyenne 1 gramme de diamant par 5 mètres cubes.

Inclusions des roches acides ou neutres. — Le cas des roches acides ou neutres est un peu différent. Dans ce genre de roches,

les minéralisateurs semblent toujours avoir été abondants et avoir contribué par leur présence à la liquidité d'un magma peu fusible. Aussi les inclusions que l'on y rencontre témoignent-elles volontiers d'une intervention volatile et l'on a même nié la possibilité de ségrégations en roches acides. A la condition de ne pas entendre le mot dans un sens trop exclusif, nous en verrons des exemples : notamment pour les minerais de fer de Kirunavara, de l'Oural, etc. Quant aux inclusions, les grains de cassitérite que l'on trouve disséminés dans d'assez nombreuses granulites, atteignant ainsi une teneur en étain de 0,5 p. 100 dans toute leur masse, répondent tout à fait à notre définition. Nous verrons plus tard qu'il existe de la cassitérite microscopique dans certains micas, où l'acide stannique paraît s'être substitué à la silice. Quand Stelzner a repris les analyses de gneiss de Freiberg avec un soin méticuleux, en pulvérisant les micas et les traitant au brome pour éliminer les portions pyriteuses, il n'y a plus trouvé d'étain et seulement du nickel, du cobalt et du cuivre; mais l'étain a été reconnu dans l'orthose et l'oligoclase en proportion de 0,03 et 0,08 p. 100.

Au Mont Franklin (Texas) on a pu essayer l'exploitation d'une masse de granite stannifère. Des granites à étain ont été également signalés en Saxe, dans les Black Hills du Dakota, etc. Quant aux pegmatites stannifères, les cas en sont, nous le verrons, nombreux, mais se rapprochent de gîtes filoniens : les pegmatites pouvant être considérées comme un intermédiaire entre la cristallisation profonde purement ignée et la cristallisation hydrothermale.

Beaucoup de gisements cuprifères sont à rapprocher des gisements stannifères. Il n'est donc pas étonnant de rencontrer des granites cuprifères, comme nous en avons trouvé de stannifères. Des cristaux de chalcopryrite apparaissent assez fréquemment dans des roches parfaitement intactes, où ils ne paraissent pas avoir pénétré après coup. Nous citerons divers granites à tourmaline avec chalcopryrite (Piedazzo, Nummedalen). Un cas analogue se présente pour des monzonites ou syénites de l'Arizona.

On peut encore citer, à ce propos, le cas de l'or, dont nous montrerons les analogies fréquentes avec l'étain et, souvent, le rapport avec des magmas granitiques. Les roches, où l'on a signalé des inclusions aurifères, sont des granites (Sonora, Colombie Britannique, Berezovsk dans l'Oural); des gabbros-diorites et diorites (Sahofa à Madagascar, Ayreshire en Rhodésie); des apaites (Transbaikalie, Montana, Mashonaland); des trachytes (Transylvanie). On peut ajouter, à ce propos, certains gneiss, dans lesquels l'introduction de l'or paraît avoir été liée au métamorphisme régional de profondeur. Pour le fer, les inclusions d'oligiste ou de pyrite sont fréquentes. L'oligiste est un élément habituel de la cristallisation de bien des roches, où il s'associe parfois au mica et donne une teinte rose aux feldspaths. On en retrouve des grains ou noyaux plus volumineux dans des pegmatites, des porphyres, ou, fréquemment, des roches volcaniques.

Parmi les métaux auxquels on songe moins pour ce genre de gisements, nous mentionnerons encore certaines traces de zinc dans des roches granitiques ou syénitiques, avec tendance néanmoins très manifeste à se rassembler par volatilité sur la périphérie.

D'une façon générale, on sait que, dans la théorie de la sécrétion latérale, ces inclusions, et elles seules, ont été considérées comme l'origine de tous les gîtes métallifères. On s'est attaché à analyser les roches voisines d'un gisement quelconque pour y retrouver des indices du métal représenté : indices qui étaient supposés avoir pu se rassembler dans une opération de lessivage superficiel. On a alors attiré l'attention sur un grand nombre de cas semblables qui, au degré d'intensité près, montrent la généralité du phénomène.

B. — GITES DE SÉGRÉGATION

Caractères généraux des ségrégations. — Les gîtes de ségrégation, ou de sécrétion magmatique, sont une forme de gisements, qui, après avoir été très négligée autrefois, tant que les études métallogéniques se sont concentrées dans l'Europe centrale, où ces types métallifères ne sont guère représentés, a, au contraire, été très étudiée, dans ces dernières années, par les géologues norvégiens, américains, etc.¹ Ils se présentent pratiquement sous la forme de noyaux, boules ou amas restreints englobés dans une roche ignée qui les entoure de toutes parts. La ségrégation proprement dite est une opération de liquation ou de différenciation qui, dans un bain igné homogène cristallisé en vase clos, a eu pour effet d'amener, par une sorte d'écoulement moléculaire, certains éléments utiles à se concentrer sur un point, tandis que d'autres, formant le résidu de ce départ, se rassemblaient sur un autre. Elle est particulièrement comparable à ce qui se passe dans notre métallurgie ordinaire². L'opération a pu être considérée comme s'étant effectuée sans aucune intervention de principes volatils. Cependant tout le monde est aujourd'hui à peu près d'accord pour admettre que l'eau, dont nous avons déjà signalé³ le rôle très actif en métallogénie, a joué un rôle; et, dans bien des cas, on constate également que d'autres éléments volatilissants, le chlore, le soufre, le phosphore, le carbone, etc., à l'état de combinaisons alcalines, ont contribué à rendre les éléments mobiles et à permettre leur séparation, ainsi qu'on le réalise en métallurgie quand on introduit, comme fondant, de la fluorine.

Plus la ségrégation se rapproche de sa définition théorique, plus, en même temps, elle paraît avoir eu lieu à grande profondeur, dans un magma basique homogène, que sa fusibilité plus grande, surtout dans ces conditions de pression, rendait plus apte à se liquater. Mais nous avons vu déjà, à propos des inclusions, que les roches neutres, ou même

¹ Il me sera permis de rappeler, que, depuis 1890, j'ai introduit dans mon cours à l'École des mines la notion de ces opérations de métallurgie purement ignée, auxquelles a été consacré, en 1897, un chapitre de ma *Contribution à l'étude des gîtes métallifères*.

² Voir, à ce sujet, les travaux de Vogt, résumés dans son traité des *Lagerstätten*, en 1910, d'IDDINGS, de KEMP, et, antérieurement, ceux de SORET, BROEGGER et TEALL. On a comparé le phénomène à ce qui se passe dans une solution saline inégalement chauffée, où la concentration s'opère dans les parties froides : la pression osmotique étant, d'après une loi de Van t'Hoff, proportionnelle à la température absolue. Dans le cas de nos roches, beaucoup d'autres considérations ont dû intervenir.

³ Page 70.

acides, pouvaient comporter d'autres ségrégations à la condition de donner au terme primitif une extension un peu plus grande et d'y admettre peut-être un commencement de départ volatil, aussitôt arrêté.

Quand la ségrégation est caractéristique, on doit pouvoir, par l'analyse de la roche encaissante, montrer le progrès de la séparation qui peu à peu a rassemblé un minéral dans un noyau interne, autour duquel on voit sa proportion diminuer quand on s'en éloigne. Les cas, qui se présentent dans certaines roches plus acides où le noyau semble brusquement séparé de son enveloppe, ne répondent déjà plus exactement à la définition.

En principe, étant d'un caractère profond et réalisées dans un milieu pauvre en minéralisateurs, la plupart des ségrégations accusent une oxydation incomplète et renferment, ou des métaux natifs (fer, fer nickélifère, platine), ou des oxydes salins, (fer, chrome, etc.) Quand on veut étudier de véritables ségrégations, il faut envisager des amas de magnétite, titano-magnétite ou fer chromé dans des gabbros, comme nous le ferons aux chapitres du fer, du chrome et du titane; et il faut les chercher dans les régions du globe très anciennement consolidées, où nous apparaissent au jour, par suite d'érosions très avancées, des zones de profondeur ultérieurement ramenées au jour: par exemple en Scandinavie, dans le Nord-Est des Etats-Unis (Monts Adirondacks), etc. On voit alors, comme l'a montré Vogt pour les minerais norvégiens, des ségrégations ferrifères oxydées se rassembler au cœur de certains massifs, tandis qu'à la périphérie se concentrent des gites de départ immédiat (ou de ségrégation périphérique) à forme sulfurée. Ces derniers ont été considérés également comme des sécrétions magmatiques; mais il devient douteux que l'opération y ait été purement ignée et ils conduisent, par des transitions insensibles, en passant par les amas pyriteux et les imprégnations diffuses de profondeur en terrains cristallophylliens schisteux, à de véritables gites filoniens. De tels départs immédiats, loin de ressembler à une ségrégation magmatique, qui a pour résultat de concentrer les minerais au cœur d'une roche ignée, en sont précisément l'opposé et nous leur consacrerons un paragraphe distinct.

Entre les gites purement ignés qui constituent les ségrégations et les gites filoniens hydrothermaux, il faut bien voir quelle est la différence. Dans les premiers, la fusion seule est supposée avoir pris part; dans les seconds, il y a eu dissolution. Mais, dans de l'eau surchauffée sous haute pression, la limite entre la fusion et la dissolution est plus difficile à établir qu'il ne le semble d'abord; et nous rencontrerons bien des cas intermédiaires où l'on hésite, dans la pratique, entre l'une et l'autre hypothèse.

Ainsi, dans un cas pris par Vogt comme exemple de ségrégation, celui du porphyre syénitique de Kristiania passant au kersanton dans ses salbandes, l'analyse montre que la proportion de pyrite a quadruplé, celle d'apatite triplé. Il y a donc eu, vers la périphérie, un départ du chlore et du soufre qui ressemble singulièrement à ce qui se passe un peu plus loin du massif igné, quand ces mêmes minéralisateurs arrivent à se rassembler dans des fractures incrustées par dissolutions hydrothermales. C'est une semblable concentration exagérée de sulfures, à laquelle est due la production des pyrites, pyrrholines nickélifères, etc.,

que nous croyons devoir séparer des ségrégations oxydées pour en former une catégorie distincte.

Maintenant, quelle est l'origine première des concentrations métallifères rassemblées par ségrégation ? On ne saurait naturellement le dire et la composition initiale du bain de fusion n'a pu manquer d'intervenir pour rendre telle ou telle roche basique plus ou moins riche en nickel ou en chrome, comme pour rendre, ailleurs, telle ou telle roche acide plus ou moins potassique ou sodique. Mais il est certain qu'ensuite le mode de cristallisation et de très légères variations dans la composition chimique ont entraîné, par contre-coup, la concentration d'un métal ou d'un autre : le titane, le nickel ou le chrome, auxquels nous sommes tentés d'attribuer un rôle spécial, s'étant comportés, à cet égard, comme les autres éléments quelconques dans la roche. On remarque, par exemple, que, lorsqu'un gabbro renferme un peu d'olivine, il s'y forme de la titano-magnétite, et, sans olivine, de l'ilménite.

Différenciation d'un magma basique. — Si l'on étudie en détail, comme l'a fait Vogt à Andopen, dans les Lofoten, la différenciation d'un magma basique, complexe au début, où les silicates basiques ont commencé par être dissous dans les silicates alcalins, jouant le rôle d'une eau-mère dans une dissolution saline, on croit apercevoir la tendance à la séparation de deux roches, qui, finalement, vont aboutir : d'une part, au péri-dot, c'est-à-dire à un silicate magnésien ; de l'autre à des roches d'anorthose ou de labrador, c'est-à-dire à un silicate aluminocalcaire. Avant d'en arriver à ces péri-dotites et à ces anorthosites, on a : d'une part, des gabbros à olivine ; de l'autre, des gabbros à diallage ou enstatite, c'est-à-dire qu'il subsiste : d'un côté, du plagioclase avec l'olivine ; de l'autre, un pyroxène lamellaire ou rhombique avec le plagioclase.

Il est intéressant de noter que les ségrégations métallifères se font très différemment dans les deux cas. Avec l'excès de l'olivine, c'est-à-dire avec la magnésie, partent le chrome, le platine, le nickel et le cobalt ; avec le gabbro à diallage, enstatite ou hypersthène (pouvant contenir de l'olivine accessoire), le titane qui en est l'élément très caractéristique¹. Le fer, élément banal, va d'un côté comme de l'autre. Quand la magnésie a complètement disparu du côté du gabbro à enstatite ou à diallage, on arrive, dans les roches exclusivement formées de labrador ou d'anorthose, à des minerais remarquablement titanifères, à des ilménites contenant 40 p. 100 d'acide titanique.

Ces *minerais de fer titanifères* sont à compter parmi les cas les plus typiques de ségrégations basiques et Vogt a montré que, lorsque les analyses étaient bien faites, on reconnaissait le titane en proportions très sensibles dans toutes les ségrégations de magnétite. Quand on suit le progrès

¹ Le phosphore, sous forme d'apatite, se concentre, en même temps, dans les hypérites à olivine, avec rutile, fer titané et oligiste. Il est accompagné d'un peu de chlore ou de fluor dans les apatites. Cependant, les minéralisateurs les plus volatils, tels que le chlore, le fluor, le bore, dont nous allons voir tout à l'heure le rôle devenir si important avec les minerais dérivés de roches acides, font ici à peu près totalement défaut. Voir 1903, L. de LAUNAY. *Notes sur la théorie des gîtes minéraux* (Ann. des M. janv.).

de leur concentration par une série d'analyses, on voit : 1° la silice tomber à 20, tandis que les oxydes de fer et de titane montent à 50; puis, 2° la silice tomber à 8, tandis que les oxydes atteignent 80; enfin, 3° la silice disparaître. En même temps que la silice, l'alumine décroît, mais moins vite, de manière qu'à la fin, il peut s'isoler exceptionnellement des spinelles ou des magnéto-corundites. La magnésic, qui s'accroît d'abord, part ensuite du côté du périclote.

Si l'on prend une roche moyenne, le titane est ordinairement au fer dans le rapport de 1 à 15; il atteint 1 à 10 dans le gabbro et peut dépasser 1 à 5 dans les minerais de fer titané. Le vanadium se concentre en même temps et sur les mêmes points, mais en restant dans la proportion de 1 à 100 par rapport au titane.

On voit encore, dans la région d'Ekersund, s'isoler, au milieu de norites à ilménite, des nodules de fer titané avec spinelle chromifère. Vogt, qui a étudié le cas, en a rapproché les magnétites titanifères avec vanadium dans l'hypérite à olivine de Taberg, le fer titané dans le gabbro du Mesabi-Range (Minnesota) et les pyroxénites à ilménite, sphène, tantalonobate et apatite dans la néphéline à pyroxène de Jacutinga au Brésil. Ces gisements présentent ce caractère commun d'être bien au centre des magmas basiques, et de renfermer toujours le titane allié au fer (comme peut l'être le silicium), plus rarement au magnésium, jamais libre. L'alumine, quand elle existe, est isolée en spinelle.

Le même géologue a fait remarquer que les très nombreuses ségrégations de magnétite titanifère connues se trouvaient, à peu près toutes, dans ces conditions, au milieu de gabbros (avec ou sans olivine), également purs en phosphore en même temps qu'assez pauvres en manganèse. Dans un très petit nombre de cas, le fer et le titane se sont concentrés avec un autre type de roches, également caractéristiques des milieux profonds, les syénites néphéliniques à forte teneur en soude, où l'on trouve, en même temps, la série des terres rares et le graphite.

En fait de minerais utilisables, dans le cas de Taberg que nous étudierons, nous aurons une hypérite à olivine se transformant, dans sa partie centrale, en une périclote à magnétite sans feldspath, où s'est isolée la magnétite titanifère très riche en vanadium (0,12 à 0,40 p. 100 d'acide vanadique).

Routivara nous fournira un magnifique amas de titano-magnétite riche en spinelle dans un gabbro-diorite et l'on peut y constater la diminution centrale de la silice, de la chaux et de la magnésic, tandis que se sont concentrés simultanément le titane, le chrome, le fer, le manganèse et la magnésic.

A Port-Henry (New-York), Kemp a étudié également, dans un champ d'anorthosite, des ségrégations de titano-magnétite.

Au Transvaal, dans le massif de Bushveldt, les lentilles de magnétite plus ou moins titanifère sont dans des gabbros et norites.

Les ségrégations de *fer chromé* sont, dans les périclotes plus ou moins serpentinisées¹, qui peuvent passer à des dunites (olivine et fer

¹ Il peut se présenter, accidentellement du spinelle chromifère dans des norites (gabbro à enstatite), par exemple à Ekersund.

chromé), en Nouvelle-Zélande, Nouvelle-Calédonie, etc., un cas également très fréquent et qui s'observe dans les pays les plus divers. Nous donnerons plus tard (fig. 181) des exemples et des coupes de ces roches à olivine avec fer chromé. C'est la forme normale, sous laquelle on extrait le chrome industriellement et ces gisements industriels présentent toutes les formes depuis la répartition du chromite dans toute la roche à titre d'élément constituant, jusqu'à sa localisation en masses tout à fait pures et parfois très volumineuses.

La concentration du *nickel* s'est également réalisée dans une foule de cas : soit à l'état de combinaisons nickélifères avec le péridot et l'ensatite, où le nickel joue un rôle analogue à celui du fer et de la magnésie, et constitue des gites d'inclusions, qui restent sans valeur jusqu'à ce qu'une altération superficielle isole le nickel à l'état de silicates ; soit par son départ périphérique à l'état de sulfures, tels que les pyrrhotines nickélifères, localisées, comme nous le verrons au paragraphe suivant, sur la périphérie des massifs. Dans les deux cas, le cobalt accompagne le nickel ; dans le premier, on trouve, en outre, du chrome concentré au cœur des massifs ; dans le second, du cuivre, parti à sa périphérie.

Dans le cas de la ségrégation périphérique, il est, comme nous le faisons remarquer tout à l'heure, très douteux que la fusion seule, au sens habituel du mot, soit intervenue.

Différenciation d'un magma neutre ou acide.— Le cas des roches neutres ou acides a, comme je l'ai déjà dit, été très discuté. Il semble cependant difficile de ne pas assimiler, avec quelques variantes, à des ségrégations, les cas d'amas ferrugineux (type Kirunavara) que l'on trouve, en Laponie, dans l'Oural, dans le bassin de l'énisséi, au Cambodge, dans l'état de Durango, au Mexique, toujours intercalés dans des types pétrographiques analogues. Dans plusieurs de ces cas, en Laponie, à Lebiachaia, près Nijni Taguilsk, comme dans l'état de Durango, la magnétite est chargée d'apatite, qui indique la présence, non seulement du phosphore, mais aussi du chlore ou du fluor et qui correspond sans doute à un commencement de pneumatolyse. A Goroblagodat ou à la Visokaya-Gora (Oural), le phosphore fait, au contraire, défaut. Le gisement de Kirunavara se trouve dans un albitophyre parfois pétrosiliceux et fluidal ; celui de Durango dans une rhyolite. Tous deux sont remarquablement purs en soufre. Ils sont, d'autre part, exempts de titane : ce qui les distingue essentiellement des tilano-magnétites, ou des ilménites précédentes. Une autre différence typique avec les ségrégations en roche basique, qui restent les cas typiques de ségrégation, c'est qu'on n'observe pas ici les transitions progressives. On est donc conduit à admettre un commencement de départ plus accentué et plus net, qui laisse supposer une première intervention de la pneumatolyse. Ce serait quelque chose d'analogue à ce que nous imaginerons bientôt pour les gites de ségrégation périphérique à forme sulfurée.

C. — GITES DE DÉPART IMMÉDIAT OU DE SÉGRÉGATION PÉRIPHÉRIQUE
SULFURÉE

Nous avons fait une catégorie à part des ségrégations périphériques, où se sont isolés des minerais sulfurés en amas fréquemment volumineux, sur le bord des roches basiques, le plus souvent dans des schistes. Ces gisements ont été ordinairement considérés comme un cas de ségrégation proprement dite, qui différencierait des ségrégations oxydées internes à la fois par sa position et par sa nature. A vrai dire, la différence entre les deux modes de classification est surtout dans la prédominance que les uns attribuent au phénomène de liquation ignée, les autres à un commencement de départ volatil et de dissolution hydrothermale, tout en admettant, je crois, des deux parts, que les deux groupes de phénomènes sont intervenus simultanément. Mais nous croyons nécessaire de séparer entièrement ces gisements des différenciations proprement dites pour bien montrer qu'il y a eu concentration, non plus dans la roche, mais à son contact, et concentration d'une substance sulfurée, que nous sommes habitués à voir ailleurs prédominer dans les gisements filoniens, et pour ne pas laisser oublier que, dans plus d'un cas semblable, la relation du minerai avec la roche voisine a même pu être discutée. Les gisements de cette origine, qui prennent, dans des roches ou terrains chimiquement inattaquables, l'apparence d'amas ségrégés, semblent bien proches parents de ceux qui, au contact d'autres roches, en terrain calcaire, ont donné les minerais associés à des gangues silicatées, dont le Banat fournit les exemples les plus nets (type D) et il serait facile de trouver des transitions nombreuses à des types franchement hydrothermaux. D'autre part, on est conduit, par d'autres cas intermédiaires, aux gisements en amas et imprégnations diffuses, qui seront examinés au chapitre suivant.

Cas du nickel. — Parmi les gisements que l'on peut classer dans cette catégorie, nous aurons à étudier surtout des minerais de nickel et de cuivre. Le fait seul que tant de gisements nickélifères se trouvent au contact de norites ou de gabbros laisse déjà supposer une relation d'origine.

Suivant Vogt, cette relation serait même telle qu'il y aurait à peu près proportionnalité entre la dimension du massif de gabbro et l'abondance des sulfures : la proportion des trois métaux, nickel, cobalt, cuivre, accusant elle-même une certaine constance. On trouve, en général, dans la roche même, les sulfures disséminés à l'état d'éléments constitutifs, d'inclusions et, d'habitude, englobant les autres minéraux par suite d'une fusibilité plus grande ou d'un apport ultérieur.

La forme ordinaire en amas de tels gisements sulfurés, pyrite, pyrite cuprifère ou pyrrhotine, concordant avec leur encaissement normal dans des schistes, semble indiquer qu'ils se sont produits, comme la pénétration d'un magma granitique, en remplissant au fur et à mesure le vide qu'un mouvement tectonique ouvrait devant eux. Il n'y a pas eu ainsi

dépôt successif, comme dans le phénomène filonien hydrothermal proprement dit, mais peut-être prise en masse d'un magma homogène, participant à la fois de l'état fondu et de l'état dissous. Souvent, en même temps, cette masse sulfurée, qui devait présenter une assez grande mobilité et garder la possibilité de rester fluide même dans de minces fractures, a pénétré par imprégnation diffuse dans les terrains de schistes encaissants et nous serons ainsi amenés à des cas que nous étudierons ultérieurement.

Certains plans de Vogt, qui doivent avoir été un peu schématisés, montrent, à Erteli, à Meinkjår en Norvège, une série de masses métallifères comprenant surtout de la pyrrhotine nickélique et faiblement cobaltifère, avec de la pyrite de fer un peu nickélique et de la chalcopyrite, réparties sur la circonférence extérieure d'un amas de norite englobé dans des schistes cristallins, gneiss, etc.⁴

Ces amas métallifères, qui peuvent atteindre 150 à 200 m. de diamètre, ont parfois l'allure de filons de contact lançant, des deux parts, des veines latérales dans la norite comme dans le gneiss. Ailleurs, sur le bord de l'amas sulfuré, on a, dans la norite, comme dans le terrain encaissant, tout un réseau compliqué de veinules divergeant d'une masse centrale. Cette pénétration à distance dans les terrains qui encaissent la roche ignée et qui devaient échapper à son action calorifique, est contraire à l'idée de sulfures fondus, simplement concentrés dans un bain de silicates. Il est beaucoup plus vraisemblable qu'il y a eu là intervention hydrothermale, et cette intervention serait même postérieure au métamorphisme régional d'après certaines coupes de minerais données par Beck, où l'on voit la pénétration de la pyrrhotine dans des parties de roches déjà complètement transformées en amphibolite. Ce serait alors un cas particulier de ces imprégnations diffuses de profondeur que nous étudierons plus tard dans les mêmes massifs cristallophylliens, où elles sont si fréquentes sous la forme de lentilles interstratifiées, de fahlbandes, etc.

De même, quand nous décrirons les grands gisements canadiens de Sudbury, également situés dans une plateforme ancienne en rapport avec des norites, nous verrons que, si la relation d'origine des minerais nickéliques avec la norite y paraît très vraisemblable, l'intervention de phénomènes hydrothermaux ne l'est pas moins. Ces amas de pyrrhotine nickélique ne sont peut-être là que le premier stade d'un départ, représenté, plus au Nord, sous la forme filonienne bien caractérisée par le beau système filonien à cobalt argentifère de la région de Cobalt.

L'on a, à Sudbury, une intrusion profonde de norite, renfermant tantôt des minerais disséminés dans sa masse, tantôt des pénétrations de minerais mouvant les silicates et y pénétrant. Le tout n'est peut-être pas si différent qu'on l'a dit des gisements filoniens développés au contact de roches éruptives tertiaires, comme nous en citerons tant d'exemples à propos du cuivre, notamment dans l'Arizona, le Nord du Mexique.

⁴ Voir plus loin les fig. 290 à 293 au chapitre du nickel. Il faut remarquer que les roches encaissantes, complètement altérées par le métamorphisme régional, ont été antérieurement assimilées à des schistes cristallins ou amphibolites. C'est dire que leurs relations de position avec les terrains voisins ne présentent pas toute la netteté désirable. La relation des gabbros avec les minerais de nickel avait été déjà soutenue par Kjærulf et Dahll, puis très vivement combattue.

Cas du cuivre. — Parmi les pyrrhotines nickélifères de Norvège ou du Canada, que nous venons de signaler, plusieurs renferment, en même temps, du cuivre. Ailleurs, d'autres magmas basiques ont dégagé des concentrations plus franchement cuprifères et, quand nous étudierons le cuivre, nous serons amenés à examiner successivement : des gîtes de départ basique, soit en même temps nickélifères (Sudbury, Lausitz, Dillenburg en Nassau), soit simplement cuprifères (type Monte Catini); puis toute une série de gisements plus franchement filoniens, mais encore en rapport direct avec des roches éruptives neutres (Serbie, Bulgarie, Algérie, Caucase, Yunnan, Japon, Montana) et enfin de véritables départs acides, où le cuivre arrive à s'associer avec l'étain, le molybdène, le bismuth, etc. De tous ces gisements, celui qui a le plus de rapports apparents avec une ségrégation est celui de Monte Catini, dont la disposition a été violemment troublée par un charriage ultérieur, mais où l'on trouve des boules de pyrite cuivreuse, ultérieurement enrichie par cémentation, en rapport avec une diabase.

Enfin il est peut-être permis de citer, comme des cas de départ acide, certains exemples de pyrite développée au contact d'un granite.

D. — GITES DE CONTACT DU TYPE BANAT

Toute notre théorie étant fondée sur une relation d'origine reliant les gisements métallifères aux roches ignées, il est naturel de trouver, entre les gisements encore englobés dans ces roches (inclusions et ségrégations) et ceux qui s'en séparent nettement à l'état de filons, une catégorie intermédiaire, où les minerais émanés de la roche se sont localisés à son contact immédiat.

Nous venons déjà d'examiner quelques gisements de ce genre, où le rapport est assez intime pour avoir pu faire penser à une forme spéciale de ségrégation magmatique. Nous réservons, d'autre part, pour l'étude des gisements hydrothermaux proprement dits, un certain nombre de filons qui, malgré leur position au contact de la roche mère, présentent, notamment dans le cas de l'étain ou du cuivre, une minéralisation franchement hydrothermale. Mais nous allons encore examiner, dans ce paragraphe, un groupe important de gisements situés entre une roche éruptive et un calcaire encaissant : gisements, dans lesquels les minerais se sont développés au milieu d'une gangue silicatée, formée elle-même aux dépens du calcaire, et où les réactions de voie ignée et de pneumatolyse semblent se présenter à la fois, avec prédominance des secondes¹.

Type des gisements. — Ce genre de gisements a été particulièrement étudié dans le Banat, où il offre une minéralisation complexe de magnétite et de sulfures divers (fer, cuivre, plomb et zinc), dans une gangue de grenat, pyroxène, etc.; mais on en retrouve également des types admirables dans l'Ouest Américain.

¹ Il va sans dire que nous ne parlons pas ici des gisements encastrés dans les calcaires par simple pénétration ou substitution hydrothermale : gisements, dont quelques-uns peuvent, par accident, s'être formés au contact d'un calcaire et d'une roche éruptive, sans avoir de relation avec celle-ci, comme ailleurs au contact d'un calcaire et d'un schiste.

Nous en donnerons la description détaillée au chapitre du fer, où nous rencontrerons ces gisements pour la première fois, sauf à en rappeler l'existence à l'occasion du cuivre, qui y domine parfois, ou, plus rapidement, à propos du manganèse, du zinc, de l'étain.

En principe — ce qui indique bien son rapport avec des dépôts magmatiques — le fer y domine de beaucoup, accessoirement le cuivre ; et les autres métaux, dont la vraie place est dans les filons hydrothermaux, comme le plomb, le zinc, etc., n'y existent qu'à titre tout à fait subordonné. La présence assez fréquente d'un peu de fluorine (Banat, White Knob en Idaho, Pitkäranta en Finlande, Sterzing en Tyrol, etc.), accuse cependant déjà la pneumatolyse, dont nous allons retrouver d'autres preuves dans l'allure et la composition des gisements.

Théoriquement, d'autres gisements de contact métamorphique pourraient se rencontrer dans des terrains autres que des calcaires, avec développement d'andalousite, chiasolithé, cordiérite, hornblende, feldspath, etc. Mais, pratiquement, nous n'avons pas de gisements semblables intéressants à signaler, si ce n'est ceux que nous allons, dans un paragraphe suivant, rattacher au métamorphisme régional.

Quand une action métamorphique a été exercée sur un calcaire, on voit communément celui-ci prendre une structure marmoréenne, en même temps que se développent le grenat, l'épidote, la wollastonite, le pyroxène, sans compter le spinelle, le corindon, la humite, le dipyre, qui peuvent se produire plus rarement dans les mêmes conditions. Dans certains cas, le pyroxène forme une première auréole entourée d'une zone à grenat, puis d'une zone à wollastonite. Souvent, avec les silicates, apparaissent quelques sulfures métalliques, ne constituant pas de gisement proprement dit : ainsi, dans le cipolin de Sainte-Marie-aux-Mines (Vosges), de la pyrrhotine avec du spinelle et des lames de phlogopite. Ces métaux se divisent parfois en deux groupes : l'un sulfuré avec le pyroxène, l'autre oxydé avec le grenat. Et à ce dernier groupe peuvent s'ajouter, quand les fumerolles contiennent du bore, un peu d'axinite. Progressivement on arrive ainsi aux véritables gisements du type Banat.

Apport d'éléments étrangers. — Dans ces gisements, il y a eu certainement, en même temps qu'élimination d'acide carbonique, apport d'éléments étrangers : non seulement des métaux exceptionnels qu'on chercherait inutilement dans le calcaire intact, mais aussi du fer, de la silice, etc. L'apport de fer, qui est souvent important, se traduit déjà par le développement de grenats ferrifères et Kemp a pu montrer, par des analyses ¹, qu'une teneur en fer suffisante pour produire ces grenats ne se rencontrait pas dans les calcaires encaissants.

Il a, à ce propos, analysé quelques calcaires soumis à ce métamorphisme. Ces calcaires, lorsqu'ils étaient particulièrement purs, tenaient 1 p. 100 de silice avec 1 à 3 de fer et d'alumine ; ailleurs 5 à 9 de silice avec 1 de Fe^2O^3 et Al^2O^3 . En examinant les silicates résultants, notamment

¹ 1906. KEMP. *Ore Depos. at the Contact of intr. rocks and limestones.* (Congrès de Mexico, p. 520 et *Ec. Geol.*, t. 2, n°4, 13 p.). — Cf. 1907. FUKUCHI. *Mineral parageneses in the Contact of metam. Ore Dep. found in Japan* (Tokyo).

les grenats, on a constaté qu'il avait dû y avoir nécessairement apport de fer : ce qui résulte d'ailleurs avec évidence du fait qu'il a cristallisé, au milieu de ces gangues silicatées, de véritables amas de magnétite. En même temps, on trouve souvent de l'hématite spéculaire, qui rappelle celle des bombes volcaniques du Vésuve.

L'oligiste peut s'expliquer par une précipitation de perchlorure de fer en présence de la calcite, comme on l'a montré par une reproduction artificielle et l'on a également fait cristalliser de la magnétite en fondant du basalte avec du calcaire.

Rôle de la pneumatolyse. — L'apport ferrugineux ne paraît pas avoir été accompagné d'une refusion des éléments ; car on retrouve souvent, dans le produit du métamorphisme, des indices de la structure primitive et même la trace des différences de composition entre deux bancs voisins. Les phénomènes d'exomorphose qui se sont produits ici comportent, suivant toutes vraisemblances, surtout des dégagements de matières volatiles, des circulations hydrothermales riches en éléments chimiques, dont on a quelquefois cru, comme nous allons le voir, retrouver la cheminée d'accès probable (San José de Tamaulipas, White Knob ¹, etc.), et ces apports métalliques, qui ont pu finir par prendre une allure de dépôt hydrothermal, se prolongent parfois assez loin au delà de la zone métamorphosée. Au voisinage de la roche éruptive, ils ont dû occuper la place laissée libre par le dégagement de l'acide carbonique ; ce qui explique leur structure fréquemment géodique.

Dans un travail intéressant, Jos. Barrelle, étudiant le district d'Elkhorn en Montana ², a remarqué que la transformation de calcaires en silicates étant accompagné d'un dégagement d'acide carbonique et d'eau, entraînait une diminution de volume, qui, d'après le calcul, atteint près de moitié s'il y a transformation complète en grenats. Il doit donc en résulter une porosité favorable à l'introduction de minerais.

Les roches éruptives ainsi agissantes sont généralement acides, peu ferrugineuses et ce n'est pas un simple départ magmatique qui a dû produire cette concentration ferrugineuse. Il a fallu un départ par fumeroles ayant d'abord transformé en grenats, ensuite introduit les minerais dans les vides. A San José de Tamaulipas on a pu suivre un lit de grenat à l'intérieur d'une diorite porphyrique et on a constaté que, dans l'intérieur de cette roche, elle avait pour suite une crevasse ouverte avec des cristaux d'orthose comme dans les pegmatites. On peut donc supposer que c'était là la fissure, par laquelle les gaz sont sortis de la roche pour aller exercer le métamorphisme grenatisant.

Dans une gangue calcaire, la silice et les autres corps en dissolution

¹ Le gisement de White Knob, dans l'Idaho, présente, comme nous le verrons, une disposition tout à fait particulière en forme de tronc d'arbre de 200 m. de hauteur rempli d'une gangue grenatifère contenant un peu de fluorine, de la magnétite, de l'oligiste et des pyrites de fer et de cuivre, rarement de la blende et de la galène. Kempy a supposé un apport profond de chaux. Certains gisements d'onx mexicains, tels que celui d'Etla (Oaxaca), correspondent à une sorte de cheminée volcanique circulaire de 250 m. de diamètre, dans laquelle le calcaire paraît s'être transformé en onx sous l'influence des gaz.

² 1902, 22nd Ann. Rep. U. S. Geol. Surv. part. 11, 399.

ne peuvent s'écartler beaucoup de la roche éruptive parce qu'ils sont absorbés et transformés en silicates dans une auréole de métamorphisme. Si la roche encaissante était inattaquable, les mêmes vapeurs auraient été amenées à se condenser et à former des dépôts filoniens.

Quand nous étudierons les gisements du Banat, qui se sont développés au contact de diorites quartzifères et de gabbro-diorites, nous verrons qu'il est arrivé d'y rencontrer une association d'or piment et réalgar avec fluorine, ayant un caractère tout à fait hydrothermal.

Principaux exemples de gisements. — Dans leur ensemble, les minerais du type Banat comprennent surtout du fer et un peu de cuivre avec une gangue grenatifère. Nous rangerons, dans le même groupe à fer dominant, avec cuivre accessoire et peu de plomb ou de zinc, les gisements de Traverselle en Piémont avec magnétite et chalcopryrite, ou, dans le gisement voisin de Brosso, avec oligiste. En Asie, nous en signalerons un grand nombre, où apparaît parfois un peu de plomb : à Bielogora dans la baie d'Olga (magnétite avec grenat) ; dans le Turkestan Russe, à Sary Boulak (veines de galène et amas de magnétite avec pyrites de fer et de cuivre dans une gangue grenatifère) ; au Japon, où Fukuchi en a groupé de très nombreux exemples. Dans l'Oural, on a quelque chose du même genre à Troitsk et à Gora Magnitnaya. En Saxe, Beck a cité Berggiesshubel. En France même, les gisements de contact pyrénéens, étudiés par A. Lacroix, rentrent dans ce type, qui est extrêmement fréquent dans le monde. Enfin, dans la Colombie Britannique, l'Arizona et le Nord du Mexique, nous en étudierons des exemples, où le cuivre devient l'élément essentiel (Boundary Creek, White Knob, Clifton et Bisbee en Arizona, Cananea et Nacozari dans la Sonora Mexicaine, Aranzazu dans la province de Zacatecas).

Comme gisements plus rares, où dominant, non plus le fer ou le cuivre, ainsi que dans le cas ordinaire, mais d'autres métaux, nous citerons plus tard un cas très spécial de métallisation stannifère à Pitkäranta en Finlande, où, le long d'un granite rapakiwi, une gangue de silicates (salite, grenat, épidote, idocrase, chondrodite) renferme un peu de cassitérite avec magnétite, sulfures de fer et de cuivre, indications de plomb, zinc et bismuth.

Ailleurs, dans le remarquable gisement de New-Jersey, où une pegmatite à allanite, zircon et orangite traverse un calcaire, on a un grand développement de franklinite, zincite, willémitte, blende, magnétite et diallogite. Il y a eu là substitution d'oxyde de manganèse à la chaux et développement de spinelles manganésifères et zincifères prenant par exception la place de la magnétite.

Au Schneeberg, près Sterzing, nous décrirons également une lentille minéralisée dans un calcaire, où la blende et la galène dominant par exception, avec de la pyrrhotine, du mispickel, de la chalcopryrite, le tout accompagné de silicates tels que le grenat et la hornblende et de fluorine, d'apatite, etc.

Enfin, l'or apparaît à Elkhorn en Montana, dans divers gites cuprifères du Chili, à Suan Holkol en Corée et nous trouverons même, dans ces conditions, un peu de platine dans une roche de grenat et wollastonite avec pyrite cuprifère et aurifère dans le Singenggu à Sumatra.

CHAPITRE V

IMPRÉGNATIONS DIFFUSES DE PROFONDEUR. VEINES INTERSTRATIFIÉES. FAHLBANDES. AMAS PYRITEUX.

La catégorie nouvelle de gisements que nous créons ici nous paraît correspondre à un type bien spécial, ne pouvant être confondu, ni avec les gisements de ségrégation ignée, ni avec les filons proprement dits, tout en participant, comme les gîtes de départ immédiat, dont ils sont, en quelque sorte, la prolongation à distance, des deux groupes de phénomènes. C'est, à notre avis, un cas intermédiaire entre les ségrégations périphériques, dont manque ici la roche ignée au contact et les filons hydrothermaux, dont fait défaut la continuité en profondeur, ainsi que la structure concrétionnée.

Ces gisements, très polymorphes, se rencontrent surtout dans les massifs d'ancienne consolidation, ou du moins dans les zones influencées par le métamorphisme régional, où ils prennent leur allure la plus typique. Ils y sont à peu près localisés dans des schistes, tantôt emplissant de minces interstices entre les feuillets, tantôt imprégnant toute une zone plissée, froissée, disloquée, tantôt métallisant un banc interstratifié d'une certaine extension, tantôt enfin remplissant, à la façon d'un laccolithé igné, les vastes baillements de ces schistes qui se sont ouverts devant eux. Plus rarement, des types analogues se présentent dans des massifs primaires non métamorphiques, mais alors en relation fréquente avec des zones de roches éruptives : par exemple, avec des traînées de microgranites, porphyrites et diabases.

Les métaux dominants y sont le fer, puis le cuivre, plus rarement le nickel, le zinc et le plomb, parfois des traces d'or, d'étain, de bismuth, à peu près dans l'ordre où nous avons trouvé les éléments de départ immédiat. On en trouvera donc la description détaillée à l'occasion de ces divers métaux.

Certains de ces gisements présentent une interstratification apparente si marquée qu'on a pu, dans bien des cas, songer à les considérer comme des dépôts contemporains de la sédimentation. Cette hypothèse, nous allons le dire, ne nous paraît pas admissible. Il y a là, à notre avis, une forme très spéciale de filons-couches, dont l'origine intrusive, épigénétique, se traduit souvent par de nombreux indices. Mais, d'autre part, il est impossible d'assimiler ces gisements, limités en tous sens et sans racine profonde directe, à des filons hydrothermaux ordinaires. Il faut imaginer, pour eux, un mode de formation spécial.

L'hypothèse, qui nous paraît la plus vraisemblable, est celle d'un départ sulfuré intimement lié avec ces manifestations ignées de profondeur, à forme surtout granitique, dont résulte originellement le métamorphisme régional. A notre avis, en même temps que se produisaient l'injection feldspathisante dont procèdent les gneiss et les autres émanations volatiles auxquelles on peut attribuer les formes multiples d'un tel métamorphisme, il y a eu, dans des conditions analogues, départ de matières sulfurées, dont l'état physique est difficile à définir, mais qui, sous de fortes pressions, devaient tout au moins conserver assez de mobilité, de fluidité, pour pénétrer dans de très minces interstices. Ces sulfures, lorsqu'ils ont été amenés à cristalliser, l'ont fait par masses homogènes à grain fin, semblant avoir rempli d'un coup tous les vides de disposition complexe où ils s'étaient introduits et ne présentant pas les dispositions zonées, les concrétions successives sur les parois, les géodes, etc., qui caractérisent les dépôts réellement hydrothermaux. Ce seraient donc, sous une autre forme, des épisodes spéciaux dans la mise en place des magmas silicatés : des vapeurs sulfurées produites par la scorification interne et condensées à distance.

Cette conception établit, on le voit, un lien de parenté entre de tels gisements et les ségrégations périphériques, dont on se rapproche dans certains gîtes en terrains non métamorphiques (type Rio Tinto) associés à une trainée de diabases et l'on conçoit qu'il soit difficile d'établir une démarcation nette séparant les uns des autres.

Divers gisements, où les minerais de sulfures et magnétite sont accompagnés d'une gangue silicatée, rappellent les gîtes de contact du type Banat étudiés plus haut. Nous citerons, par exemple : Bersbo en Suède, Pitkäranta et Orijärvi en Finlande, Sterzing (Tyrol), Bodenmais (Bavière), peut-être Ducktown en Tennessee. New Jersey, dans des conditions très différentes, présente une association analogue. Ailleurs, à Ookiep en Namaqualand, on a également le passage à une ségrégation périphérique.

Nous ne croyons pas néanmoins que le lien de tels minerais avec une roche ignée soit nécessairement intime, comme l'ont supposé notamment des géologues norvégiens et allemands ; il y a peut-être quelque excès de théorie à vouloir toujours trouver un gabbro ou une roche de la même famille au contact immédiat de tout amas pyriteux. D'autre part, et c'est pourquoi nous faisons cette observation, des transitions analogues conduisent à l'inverse progressivement jusqu'à de véritables filons, sans que, dans ce sens non plus, la démarcation puisse nettement s'établir. La nature nous livre une chaîne continue, dans laquelle nos coupures sont artificielles. Avec cette restriction, les gisements envisagés dans ce chapitre offrent une réelle homogénéité, comme nous allons le voir en examinant tour à tour les provinces métallogéniques où on les rencontre, leurs conditions de gisements, leur forme et leurs dimensions, enfin leur métallisation, pour arriver finalement à discuter leur origine.

1° PROVINCES MÉTALLOGÉNIQUES A IMPRÉGNATIONS PYRITEUSES

Le plus grand nombre des gisements examinés dans ce chapitre se présentent, nous l'avons dit, dans des zones à terrains plissés, affectées

par le métamorphisme régional de profondeur et pénétrées par des roches éruptives, avec lesquelles les pyrites semblent en relation d'origine plus ou moins directe. Cependant, la remarque vient d'être faite, cette localisation dans les terrains métamorphiques n'est pas absolue. Les provinces métallogéniques à imprégnations et amas de pyrites peuvent être divisées en plusieurs catégories ayant chacune certains traits particuliers.

Tout d'abord, le cas est très fréquent dans les plates-formes primitives, où le métamorphisme régional de profondeur est général et où la majorité des roches représentées sont des roches grenues de profondeur, à l'exclusion ordinaire des roches microgrenues et microlithiques. La Scandinavie, le Canada, la Sibérie, le Brésil, l'Afrique Australe en présentent des exemples très nombreux et très caractéristiques, que nous aurons à étudier plus tard aussi bien pour le cuivre ou le nickel que pour le zinc ou l'or. Exceptionnellement, il s'y rencontre même de l'étain. C'est en Scandinavie et au Canada que les formations pyriteuses paraissent dériver le plus directement des ségrégations magmatiques et qu'on les trouve le plus intimement liées à des gabbros, norites, etc.

En second lieu, les chaînes hercyniennes offrent, elles aussi, de très nombreuses formations pyriteuses, dont l'âge peut être généralement rattaché à la période carboniféro-permienne. Situées souvent dans des terrains moins métamorphiques, elles semblent, pour la plupart, en rapport avec des roches d'un type moins profond, appartenant à la famille intrusive et microgrenue des microgranites et diabases ophitiques passant aux porphyrites. Le rapport avec les roches éruptives ne paraît guère y atteindre le caractère de la différenciation magmatique. En même temps, nous verrons que la métallisation est un peu différente. Le nickel ne joue plus qu'un rôle très subordonné. La pyrrotine, assez fréquente dans le premier groupe pour qu'on ait été tenté d'expliquer sa présence par une réaction métamorphique exercée sur la pyrite, fait à peu près défaut.

En troisième lieu, les chaînes tertiaires renferment, elles aussi, des imprégnations pyriteuses. Celles-ci peuvent s'y trouver sur des noyaux affectés par le métamorphisme régional à une époque quelconque et se rapprochent alors des types précédents. Mais, dans les parties non métamorphosées, la métallisation pyriteuse tend vers les types filoniens par l'intermédiaire des filons-couches ou des filons de contact, comme elle tendait vers les types magmatiques dans les plates-formes primitives, et l'on passe ainsi à des filons pyriteux auro-argentifères.

2° CONDITIONS DE GISEMENTS

Les gisements, que nous rapprochons ici comme ayant à peu près la même origine, présentent, nous l'avons dit en commençant, des types extérieurs assez variés, correspondant à des subdivisions qu'il est presque impossible de conserver dans la classification de détail, parce qu'on trouve simultanément, dans les mêmes mines, deux ou trois types différents, mais qu'il va être néanmoins intéressant de mettre en lumière dans cette première étude théorique. Un de leurs traits communs, que nous avons de suite signalé, est leur localisation très habituelle,

presque constante, dans les terrains schisteux ou cristallophylliens, à l'exclusion des calcaires et des grès. Cela nous paraît tenir à deux causes principales. Tout d'abord, nous avons déjà remarqué combien était habituel, autour des gisements pyriteux en amas ou fahlbandes, le métamorphisme régional. Or, le premier effet de ce métamorphisme est d'éliminer le plus grand nombre des calcaires et de transformer les grès en quartzites. Mais, lors même que ce métamorphisme n'a pas agi, les types de gisements que nous rapprochons dans ce chapitre sont précisément ceux à la formation desquels se prêtent, par leur souplesse, leur flexibilité, leurs délits nombreux, etc., les terrains schisteux. Une métallisation analogue pénétrant dans un calcaire n'a pu que s'y localiser dans des diaclases en prenant un caractère plus filonien, ou se concentrer sur le contact de ces calcaires et des schistes, ou encore, quand la roche mère silicatée était voisine, transformer le calcaire lui-même en une gangue de silicates englobant les minerais, c'est-à-dire passer au type Banat, précédemment étudié. De même, dans les grès ou poudingues, il est probable que des pyritisations, analogues comme origine, ont dû, prenant une forme différente, aboutir à des types de conglomérats pyriteux, comme ceux du Lac Supérieur, ou peut-être du Witwatersrand.

Restant donc dans les terrains schisteux et cristallophylliens, nous y trouvons, comme types principaux, les allures suivantes :

a) Zones de pyritisations diffuses dans les schistes : types Røros, Sulitjelma, etc. ;

b) Zones broyées pyritisées, fahlbandes, ruschels, streichen, etc. : types Kongsberg, Mount Lyell, Schmollnitz, Graslitz, Bodenmais, etc. ;

c) Lentilles allongées interstratifiées : types Røros, Sulitjelma, Ducktown ;

d) Grands amas lenticulaires avec prolongements étirés suivant la stratification : types Falun, Rio Tinto, Mount Lyell, Agordo, Sain Bell, etc. ;

e) Fractures prenant un type filonien.

Le tableau 5 page 93 montrera aussitôt, en résumé, ce qui résultera plus tard de nos descriptions : le rapprochement de ces divers types, groupés par deux ou trois, dans les mêmes districts ou les mêmes mines. On pourrait encore leur assimiler hypothétiquement les gisements, très différents d'aspect, auxquels nous avons fait allusion plus haut en parlant des imprégnations dans les calcaires ou les grès et, dans une théorie que nous n'adopterons pas, on y rangerait aussi des types d'une apparence spéciale comme les schistes cuprifères du Mansfeld.

Parmi les types que nous venons d'énumérer, quelques-uns demandent une courte description.

a) **Zones de pyritisation diffuse.** — Nous entendons par ce terme un phénomène qui se présente fréquemment dans les terrains métamorphiques de Scandinavie, Norvège, etc. : l'existence de zones plus ou moins lenticulaires, dans lesquelles la pyritisation n'est pas localisée en amas ou veines, mais éparpillée dans tous les joints des schistes, talcschistes, gneiss, etc., en sorte que l'exploitation industrielle donne généralement des résultats médiocres et qu'il faut tout au moins recourir, comme à Graslitz, à une concentration mécanique. Le minerai se compose alors de minces vei-

TABLEAU 5, MONTRANT L'ALLURE DE QUELQUES IMPRÉGNATIONS SULFURÉES

NOM DU GISEMENT	Sain-Bel.	Falun.	Rörös.	Sulltjelma.	Vignes.	Atvidaberg.	Kopparstrand.	Sjangeit.	Prov. d'Huelva.	Agordo.	Rammelsberg.	Graslitz	Schmöllnitz.	Bukowine.	Bodenmais.	Terre-Neuve.	Ducktown.	Shasta.	Namaqualand.	Mount Lyell.	Ammeberg.	Ravala.	Sterzing.	Schladming.	Pitkäranta.	
1° Structure.																										
Imprégnation diffuse dans les schistes			+	+			+	+	+			+		+			+		+			+	+	+	+	
Fahlbandes (zones pyriteuses broyées), ruschels, streichen, etc. . .							+					+	+		+					+						
Lentilles allongées interstratifiées.						+		+	+			+	+		+		+		+		+	+	+	+	+	
Grands amas avec prolongement étiré suivant la stratification . .	+	+			+				+	+	+		+			+	+	+	+	+			+	+	+	
2° Minéralisation ¹.																										
Pyrite de fer non cuivreuse.	●								●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●					
Pyrite de fer cuivreuse.	+								●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		+	+	+	+
(Teneur en cuivre, p. 100		2 à 3	0 à 3						0 à 3	1,70		1 à 3	0,5				5	0 à 6		2,35						
(Teneur en argent (grammes à la tonne)									30									60		85						
(Teneur en or (grammes à la tonne)		+							0	à 0,8					+	+	1,5		3			+	+	●	+	
Pyrrhotine												+			+		+									
Nickel																										
Blende et galène			+		+					+	+	+									●	●	●	●	●	
Étain																									●	
Bismuth													+													
Molybdène							+																			
Magnétite						+										+									+	
Barytine											+															

1. La minéralisation caractéristique est marquée par un ●; la simple présence d'un corps par une +.

nules pyriteuses, plissées et discontinues, alternant avec des veinules schisteuses ou feldspathiques. C'est souvent dans de tels cas qui, pour nous, procèdent incontestablement d'une pénétration intrusive, que l'on a cru trouver les preuves d'une sédimentation contemporaine, en faisant remarquer le parallélisme local de ces veines diverses qui se suivent dans toutes leurs multiples inflexions. Notre figure 4, représentant un échantillon d'Ammeberg, en montre un exemple tout à fait typique, auquel on peut comparer les coupes que nous donnerons plus tard (fig. 366 et 367) de certains minerais du Rammelsberg. Un tel parallélisme

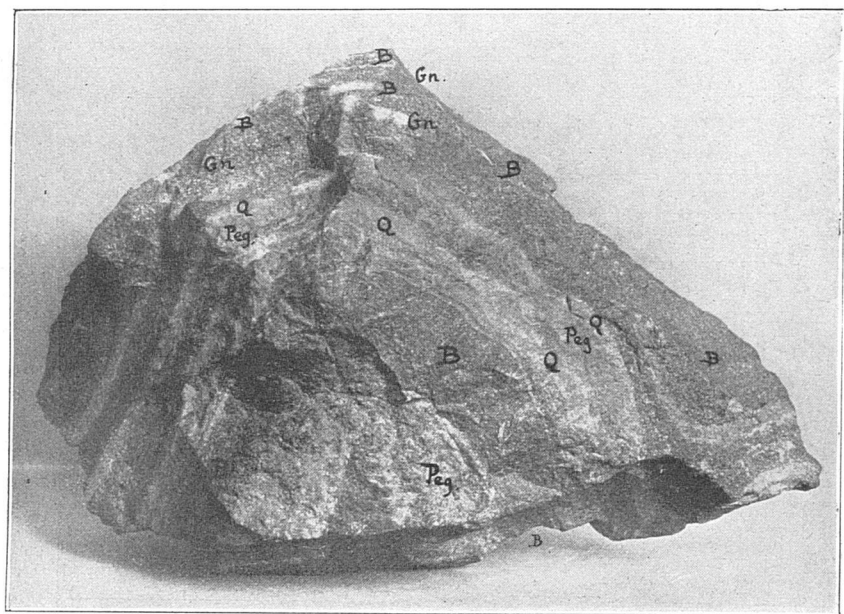


Fig. 4. — Type de blende rubanée et plissée (B) alternant avec des zones de quartz (Q), de pegmatite (Peg), de gneiss (Gn).

est, à notre avis, l'indice que la pyrite a pénétré entre les feuillets déjà plissés en remplissant les interstices et formant une roche compacte. Si un ensemble sédimentaire de couches alternantes à compacité aussi différente avait été soumis ultérieurement à une action mécanique, jamais les zones pyriteuses n'auraient conservé la continuité qu'on y constate.

Nous attachons une très grande importance théorique à ces zones de pyritisation diffuse des plates-formes primitives, en raison notamment des traces d'or qui y sont fréquemment associées. Cet or, très disséminé, a pu, dans la suite, devenir l'origine de placers à enrichissement mécanique poussé très loin, donnant lieu à des exploitations très prospères, sans qu'il existe un gisement primitif réellement utilisable.

b) **Fahlbandes, etc.** — Les mouvements dynamiques qui ont précédés

et, comme on le constate souvent, accompagné ou suivi la métallisation, ont déterminé des zones de glissement, de dislocation, de broyage, qui sont déjà, dans une certaine mesure, une forme profonde de cassure filonienne, mais qui, en raison de la nature schisteuse ou laminée et émiettée des éponges, n'ont pas donné lieu à de grands vides et se sont remplies des produits disloqués de leurs parois. L'injection des pyrites dans de telles zones a donné lieu à des trainées pyriteuses souvent grossièrement inters-

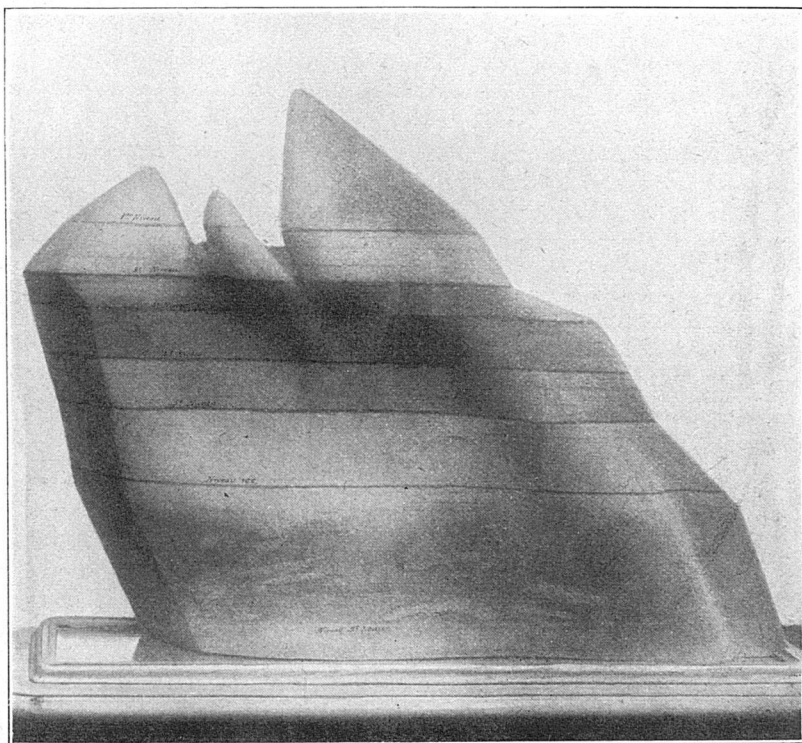


Fig. 5. — La lentille de pyrite Saint-Gobain à Sain Bel.

stratifiées, mais sujettes aussi à traverser obliquement des roches rencontrées, gabbros, serpentines, etc. : zones auxquelles on donne les noms de fahlbandes, brande, ruschels, streichen, etc., suivant les pays et suivant leur allure particulière. Ces fahlbandes sont rarement assez riches pour valoir une exploitation particulière et on les passe souvent sous silence. Mais il est arrivé bien des fois que des fractures transversales aient subi à leur intersection un enrichissement, dont nous aurons à examiner la cause, et soient devenus utilisables pour argent, cobalt, etc., et il est facile de voir que ces types de fahlbandes s'associent parfois, soit avec le type précédent, soit avec quelqu'un des types suivants.

c) **Lentilles allongées interstratifiées.** — Ce type peut présenter, tantôt

une pyritisation presque locale et des veines de quelques mètres de long, tantôt des couches de minerais tellement prolongées qu'on leur a attribué une origine sédimentaire¹. Nous en distinguons les amas qui feront l'objet d'un paragraphe suivant. Il s'agit donc uniquement des veines offrant une épaisseur à peu près uniforme et relativement peu épaisses. De telles veines, ayant un ou deux mètres d'épaisseur, forment l'objet principal d'exploitations comme celles de Røros ou de Sulitjelma; on les retrouve à

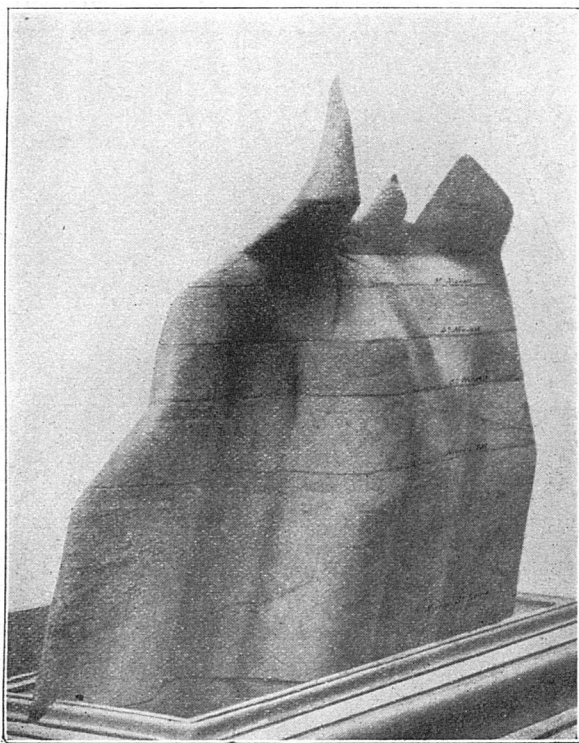


Fig. 6. — La lentille de pyrite Saint-Gobain à Sain Bel.

Bodenmais, à Ducktown. Nous considérons comme leur type extrême le cas des couches blendeuses de Ammeberg, et c'est à leur suite qu'il conviendrait également de placer des cas problématiques comme les schistes cuprifères de Mansfeld, ou encore des niveaux de conglomates métallisés sur une grande extension (Witwatersrand, etc.), si l'on admettait leur origine épigénétique.

d) Amas lenticulaires. — Les grands amas et lentilles de pyrite ou de pyrrhotine sont le type qui attire le plus l'attention, tant par la richesse

¹ Voir nos coupes de Killingdal (fig. 7), Foldal (fig. 301 et 302), Vigsnaes (fig. 303 et 304), celle des pyrites aurifères de Pestarena (fig. 509), etc.

des gisements qu'il constitue que par les dimensions anormales auxquelles il atteint et par l'obscurité des problèmes que présente son origine. Ces amas, comme nous l'avons vu, se présentent dans les schistes primaires ayant gardé leur allure sédimentaire, ou dans les terrains cristallophylliens. C'est dans le premier groupe que l'on en connaît les exemples les plus colossaux (province d'Huelva); mais il en existe également de très grands dans les terrains métamorphiques (Vigsnaes, Sain Bel).

Ces amas pyriteux forment des chapelets de lentilles plus ou moins développées, affectant, au moins dans leur ensemble et souvent aussi dans le détail, une direction conforme avec celle des schistes encaissants et s'allongeant suivant leur schistosité, de telle sorte que leur plan d'ensemble rappelle souvent beaucoup (malgré quelques différences de détail, sur lesquelles J. Vogt a insisté¹), celui de gisements tout à fait différents, intercalés eux aussi dans le terrain cristallophyllien, les gisements de fer oxydé scandinaves, dans lesquels, notons-le en passant, il peut

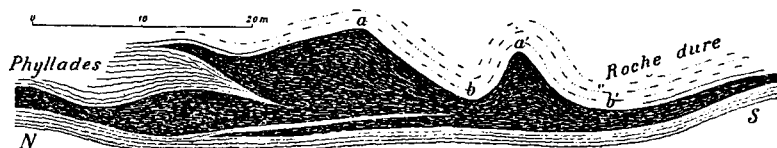


Fig. 7. — Coupe du gisement pyriteux de Killingdal en Norvège, d'après Vogt, accusant la conformité générale avec les plis *a* et *b* du terrain encaissant et des bifurcations en cul-de-sac.

exister, en même temps, une teneur sensible en cuivre pyriteux (Svappavara, etc.).

On a ainsi des sortes de disques ellipsoïdaux couchés dans le plan de stratification et souvent prolongés par un étirement, qui peut, ou se coincer complètement, ou amener, après une serrée, un autre amas suivant. Les reproductions que nous donnons de la lentille pyriteuse Saint-Gobain à Sain Bel (fig. 5 et 6) accusent particulièrement bien cette allure lenticulaire². Sur une carte, où les terrains encaissants plissés et redressés sont représentés par des traînées parallèles avec retour possible des mêmes strates par plissement, les lentilles de pyrites apparaissent (voir les fig. 302 et 305, etc.) comme des séries d'ellipses très allongées, occupant dans l'ensemble une bande qui peut avoir 200 km. et, dans cette bande, se succédant les unes aux autres en changeant constamment de strates et de niveaux.

En plan vertical, la position de ces amas est naturellement tout à fait indépendante de la superficie actuelle, qui les coupe au hasard, tantôt au sommet d'un ellipsoïde avec renflement au-dessous, tantôt au contraire à sa base avec coincement presque immédiat. Il est facile de comprendre que la section horizontale résultant de la superficie actuelle en atteint seulement un petit nombre et qu'il doit en exister beaucoup en profon-

¹ Z. f. pr. G., avril 1894.

² Voir également, au chapitre du cuivre, les coupes de Vigsnaes (fig. 303).

TABLEAU 6. COMPARAISON DES PRINCIPAUX AMAS PYRITEUX

NOMS DES GISEMENTS		Inclinaison. degrés.	Longueur.	Largeur maxima.	Section horizontale. m ²	Section perpendiculaire à l'inclinaison. m ²	Plus grande longueur reconnue suivant l'inclinaison. (mètres.)	Cubage approximatif. (millions de tonnes.)	Quantités extraites. (millions de tonnes.)	Quantités à extraire. (millions de tonnes.)	Cubage théorique de la lentille primitive avant toute érosion et toute oxydation. (millions de tonnes.)	Quantité de cuivre extrait. (mille tonnes.)	Total du cuivre contenu dans la masse pyriteuse. (Cotonne 8). (millions de tonnes.)	Teneur moyenne obtenue en divisant 13 par 8.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Rio Tinto (Espagne).	Dionisio. . .	vertical	1 000	150	60-70 000	60-70 000	375	170 à 200	55 à 65	115 à 125	400	1 800	3 000 à 4 000	1,5 à 2	
	Filon Sud. . .	vertical	1 400	180		50 000	50 000								300
Tharsis. (Espagne).	Filon Nord. . .	vertical	300	100	100 000	25 000	150	30 à 35	22 à 25	10 à 15	70	600 à 800 (?)	»	»	
	Filon Nord.		780	120		25 000									
	Filon Sierra Bullones . . .		260	60											
	Filon Poca Pringue.	45 à 90	80	20											
	Filon du centre		240	60											
Filon du Sud.		1 000	100												
Falun	»	»	»	»	»	350	20	15	5	40	480	700	»		
San Domingos (Portugal).	vertical	400	75	13 000	15 000	150	20	10	10	40	»	»	»		
Sain Bel (France)	80°	1 300	44	16 500	16 500	230	11	6	5	11	»	»	»		
Aguas Tenidas (Espagne)	vertical	150	50	7 500	7 500	150	3 à 4	»	»	»	»	»	»		
Rammelsberg (Allemagne)	45°	1 400	20	8 000	6 000	»	»	»	»	»	»	»	»		
Foldal (Norvège)	45 à 80	550	14	1 700-2 000	1 300-1 500	»	»	0,3	»	»	»	»	»		
Schmollnitz (Hongrie) . . .	»	»	»	»	»	»	2 à 3	»	»	»	»	»	»		
Röros. (Norvège). (Storvarts grube . . .	5 à 15°	350	3	»	»	1 350	2 à 3	1,7	1 à 2	»	75	»	»		
(Norvège). (Mug-grube	5 à 15°	150	3	»	»	1 050	»	»	»	»	»	»	»		
Vigsnaes (7 couches)	vertical	500	20	»	»	750	1	1	»	»	»	»	»		
(Norvège).															
Agordo (Vénétie)	vertical	250	80	»	800	150	0,9	0,9	»	»	»	»	1,60		

GITES MINÉRAUX ET MÉTALLIFÈRES

deur, souvent même très près de la surface, que nous n'avons actuellement aucun moyen pratique de soupçonner.

Généralement ces amas sont enveloppés par des schistes qui en épousent la forme extérieure; mais il est également fréquent de voir à leur périphérie, comme sur notre figure 7, des surfaces de brisure, des bifurcations aboutissant à des culs-de-sac ou des pénétrations latérales qui ramènent aux types précédents *a*, *b* ou *c*. Dans l'intérieur des lentilles les plus homogènes et les plus compactes, on retrouve des esquilles schisteuses englobées, ou du moins des parties veinées, zonées, qui ont conservé leur ancienne disposition schisteuse.

Il faut ajouter que les amas pyriteux présentent fréquemment des indices de dislocations ultérieures, qui peuvent se traduire par de véritables brèches, ou, ailleurs, par des surfaces de glissement ayant pris, dans le frottement de deux masses pyriteuses l'une sur l'autre, l'apparence remarquable désignée sous le nom de miroirs ou cuirasses (har niche). Nous donnons, dans le tableau 6, les dimensions comparées des principaux amas pyriteux pour permettre de fixer les idées.

J'ajoute, d'après Vogt, un tableau 7 plus détaillé des principaux gîtes norvégiens.

TABLEAU 7. DIMENSIONS DES AMAS PYRITEUX NORVÉGIENS

GISEMENTS	LONGUEUR	EXTENSION	PUISSANCE	PENTE		
	ouverte suivant l'inclinaison	suivant la direction.	moyenne.	des schistes encaissants.		
	mètres.	mètres.	mètres.			
Röros . . .	Kongens grufve . . .	2 000	50-150	1-5	variable.	
	Storvarts grufve . . .	1 400	120-300	0,5-3		6°
	Mug grufve	1 250	110-160	0,2-1,5		4°
Sulitjelma . . .	Giken	900	150-180	0,5-2,5	25-30°	
	Charlotte	600	250-300	0,3-2	20-25°	
	Ny-Sulitjelma	650	200-250	2-9	33-45°	
Lillefjeld, Meraker	500	100-120	1-3	60°		
Killingdal	500	65-85	2-10	25°		

3° NATURE DE LA MÉTALLISATION

Dans les cas vraiment normaux et caractéristiques du groupe que nous examinons ici, la métallisation de beaucoup la plus habituelle est la pyrite de fer, avec traces de cuivre pouvant atteindre 2 ou 3 p. 100, rarement plus, et quantités insignifiantes d'autres métaux, or, argent, plomb, zinc, etc. Nous aurons, dans deux chapitres ultérieurs, à examiner : d'une part, les pyrites de fer non cuprifères, du moins ne renfermant que des traces de cuivre, et exploitées uniquement pour soufre, dont Sain Bel constitue un des meilleurs types; de l'autre, les pyrites cuprifères qui se relieut aux précédentes par toute une série de cas intermédiaires (province d'Huelva, Falun, Agordo).

¹ Voir la coupe de Killingdsal, fig. 7, p. 97.

A côté de ce cas essentiel, on peut envisager l'apparition de la pyrrhotine, qui a été considérée par divers géologues comme devant être exclusivement réservée aux ségrégations périphériques, mais qui, en réalité, apparaît encore dans certains gîtes examinés dans ce chapitre, et qui y entraîne parfois la présence du nickel.

Il est vrai que l'on a cru expliquer uniformément cette pyrrhotine par l'effet du métamorphisme sur la pyrite. Cette explication, peut-être vraie dans des cas particuliers⁴, nous paraît insuffisante en général, étant donné notamment la relation qui paraît exister entre la prédominance de la pyrite ou de la pyrrhotine et la nature des métaux associés. Pratiquement tout au moins, nous aurons à étudier : 1° des pyrrhotines nickelifères et cuprifères, qui paraissent généralement en rapport très direct avec des norites ou autres roches de profondeur, souvent même ségrégées au milieu de celles-ci et rentrant alors dans le groupe examiné au chapitre précédent (Sudbury, Meinkjär, Ringérike, Lausitz, Forêt Noire), et 2° des fahlbandes nickelifères qui peuvent être considérées comme des filons-couches (Schladming, Val d'Anniviers).

Dans ce dernier groupe, on trouve la métallisation nickélifère disposée par traînées parallèles, avec association de pyrite cuivreuse et autres sulfures métalliques.

Un groupe différent est formé par les imprégnations plus rares, où le zinc et le plomb apparaissent, ou même deviennent dominants. Nous étudierons à cet égard le cas d'Ammeberg qui est un type spécialement zincifère. Mais, ailleurs, nous aurons maintes fois l'occasion de signaler un peu de zinc et de plomb : à Røros et Sulitjelma en Norvège, à Agordo en Vénétie, à Graslitz, au Rammelsberg, etc.

Les terrains cristallophylliens de l'Europe centrale présentent, à Sterzing (Tyrol), à Bodenmais (Bavière), etc., des sortes de fahlbandes, tantôt simplement pyriteuses (avec pyrrhotine), tantôt cuprifères, tantôt riches en nickel et en cobalt, ailleurs en zinc.

On voit encore l'étain ou le bismuth se montrer dans certains cas très particuliers de ce genre (Pitkäranta). A Orijärvi, en Finlande, on a de même un peu de molybdénite avec une association de pyrite cuivreuse, pyrrhotine et magnétite. On signale du bismuth à Schmöllnitz.

Enfin, quand nous arriverons au chapitre de l'or, nous réserverons une place importante à des imprégnations diffuses de ce genre, qui, inutilisables pour la plupart par elles-mêmes, ont pu néanmoins donner, par altération superficielle et par concentration mécanique ultérieure, des placers d'une grande richesse.

Passons très rapidement en revue ces divers cas.

Si nous considérons d'abord le cas des pyrites légèrement cuprifères, on peut remarquer que la présence du cuivre est presque constante dans les amas pyriteux, comme cela arrive dans la plupart des gisements en relation à peu près directe avec des magmas granitisants ou des roches acides. Cette teneur y dépasse très rarement 3 p. 100 en moyenne. Assez fréquemment un peu de nickel s'y joint en proportion moindre. Ce nickel ne dépasse guère 0,2, tandis qu'il atteint 2 p. 100 dans les pyrrhotines

⁴ 1904. KLOCKMANN. *Einfluss der Metamorphose auf Kieslagerstätten* (Z. f. p. G., p. 153).

nickelifères de ségrégation périphérique étudiées précédemment. La teneur en manganèse, toujours faible, mais néanmoins intéressante à noter, en raison des concentrations superficielles auxquelles elle a pu donner lieu, ne dépasse guère 0,1 p. 100. Le plomb et le zinc apparaissent presque toujours, mais en traces, sauf sur des points de concentration locaux. Quant aux métaux précieux, le tableau 5, page 93, en donne la proportion dans quelques cas. Ce tableau met en évidence un fait intéressant, c'est, sinon une constance dans la proportion relative du cuivre, de l'or et de l'argent, du moins le maintien des teneurs entre certaines limites qui leur attribuent toujours le même ordre. Il y a lieu de noter la présence de quelques traces d'étain (Pitkäranta), ou encore de bismuth, qui rappellent la relation possible de certains de ces amas pyriteux avec des magmas granitiques. La teneur en arsenic (provenant des mispickels) est très variable entre 0 et 0,80 p. 100 : elle a une grande importance pratique.

Les gisements de ce genre n'ont pas, pour la plupart, de gangue proprement dite, abstraction faite bien entendu des emprunts aux roches encaissantes, et c'est là un caractère qui les distingue bien des gîtes filoniens. On trouve cependant, mélangée avec la pyrite, une certaine proportion de quartz et l'on a même signalé à Bodenmais, dans le Bayrischer Wald, la présence de cristaux de quartz bipyramidé comme une assimilation avec les roches éruptives. En dehors du quartz, il arrive de trouver un peu de barytine dans les parties hautes de quelques gîtes tels que le Rammelsberg et Mount Lyell. La fluorine n'apparaît que dans les gîtes réellement filoniens.

Variations de la teneur en cuivre. — Au sujet de la teneur en cuivre, qui est industriellement le fait capital, on a fait beaucoup d'observations destinées à établir une loi des variations de ce métal en allant de la périphérie au centre, ou de la surface au fond de l'amas. Ces observations ont semblé souvent montrer une concentration du cuivre dans les parties latérales, parfois avec prédominance sur une éponte plutôt que sur l'autre, ou encore un appauvrissement en cuivre dans la profondeur. Il y a lieu de remarquer à ce propos la difficulté pratique de telles observations, qui, pour avoir une valeur, ne peuvent être effectuées par prises d'essai, mais seulement fondées sur l'abatage de chantiers un peu développés. Or, il est rare que l'on puisse pratiquement isoler le minerai d'une zone géologique de celui d'une autre, les nécessités techniques de l'abatage ne le permettant pas ; et, d'autre part, quand il s'agit des changements en profondeur, pour lesquels l'observation est plus facile puisqu'on exploite en général par tranches successives, on doit tenir compte des modifications dans le prix de revient qui permettent souvent, à mesure qu'une exploitation se prolonge, d'utiliser des minerais pauvres, auparavant rejetés dans le stérile. Bien des considérations industrielles peuvent également rendre suspects certains chiffres publiés. Avec ces restrictions, le fait d'une diminution du cuivre en profondeur paraît cependant souvent bien constaté ; mais son explication la plus probable, qui est en tout cas exacte pour toute la zone haute, comme nous le verrons plus tard, est dans les phénomènes d'altération secondaire. On retrouve le même phénomène dans les filons cupro-plomb-

bifères, qui s'appauvrissent en cuivre dans la profondeur. Quant à la concentration du cuivre sur les parois, si elle est exacte, elle peut s'expliquer par une lixivation opérée au moment de la cristallisation; mais elle peut également avoir été influencée par le processus de cette altération qui a dû être surtout active le long des contacts schisteux, plus que dans la masse de la pyrite.

Altérations superficielles. — Nous arrivons ainsi à un groupe de faits très importants pour ces gisements pyriteux, ce sont les altérations d'origine superficielle, dont nous étudierons ailleurs les lois générales, mais dont il faut signaler l'effet dans ce cas particulier.

Les gisements pyriteux sont à peu près toujours, sauf dans les régions très nivelées et à niveau hydrostatique presque superficiel, annoncés à la surface par un chapeau de fer résultant de l'oxydation de la pyrite transformée en limonite. Ce chapeau est, d'ordinaire, appauvri en cuivre, les sels de cuivre étant trop solubles pour s'être précipités dans ces conditions. En revanche, on remarque parfois, dans les gisements de pyrite aurifère, la production d'un peu d'ornatif. Au-dessous de ce chapeau de limonite vient ce que j'ai appelé ailleurs la zone de cémentation : zone dans laquelle sont venus s'accumuler les sels de cuivre provenant de toute la partie supérieure du gisement, tant de ce qui a aujourd'hui disparu que de ce qui a été transformé en limonite. Ces sels de cuivre, descendant le long de l'amas, y ont produit deux catégories de réactions un peu différentes. Il y a eu d'abord cristallisation de minerais enrichis en cuivre, tels que la chalcoppyrite, la phillipsite ou même la chalcosine et le cuivre natif dans des fissures de l'amas pyriteux. Il y a eu ensuite, dans tout ou partie de cet amas, un phénomène de nourrissage, qui a d'abord produit, avec la pyrite, de la chalcoppyrite, puis, avec celle-ci, de la phillipsite. Les deux phénomènes déterminent un enrichissement marqué en cuivre aussitôt au-dessous du chapeau de fer, dans une courte zone, où l'on commence par trouver des teneurs moyennes de 5 à 10 p. 100 de cuivre pour des gisements destinés plus tard à n'en contenir que 2 ou 3. La plupart des grosses teneurs annoncées au début des exploitations n'ont pas d'autre cause. Mais le phénomène d'altération paraît se prolonger en s'atténuant peu à peu jusqu'au fond des amas, et c'est pour nous la principale raison de l'appauvrissement en cuivre, souvent constaté, comme nous le disions plus haut (Vigsnaes, San Domingos, etc.).

4° THÉORIE DES GISEMENTS PYRITEUX

La théorie des gisements pyriteux, ou plus généralement sulfurés, examinés dans ce chapitre, offre de grandes obscurités, qui expliquent les hypothèses multiples proposées à leur sujet. Tout d'abord, il me paraît nécessaire d'éliminer les deux hypothèses sédimentaires ou filoniennes, qui ont eu et ont encore de nombreux partisans¹.

¹ Le gisement du Rammelsberg est encore considéré comme sédimentaire même dans l'ouvrage de Beyschlag, Krusch et Vogt, qui défend en général l'idée d'une ségrégation magnétique.

L'hypothèse sédimentaire a contre elle toute une série d'arguments capitaux, qui résultent de nos descriptions détaillées : tout d'abord, la distribution des amas et lentilles dans des niveaux différents d'une même région et parfois même dans des terrains géologiques d'âge distinct ; puis leur relation si fréquemment vraisemblable avec des réactions de métamorphisme régional ou avec des roches éruptives ; leur allure même qui, malgré une grossière interstratification facilement explicable en toute hypothèse, implique des pénétrations latérales dans le toit comme dans le mur ; enfin l'impossibilité de comparer un système d'amas de 400 millions de tonnes comme ceux de Rio-Tinto avec les boules de marcassite ou les pyritisations de fossiles qui peuvent se produire dans nos vases littorales. Nous avons déjà discuté précédemment¹ l'un des arguments que l'on a parfois invoqués en faveur de la thèse sédimentaire, à savoir le parallélisme de détail des inflexions pyriteuses et stériles et nous avons dit alors comment nous y voyons tout au contraire une preuve de l'intrusion postérieure. Quant aux variations d'une éponte à l'autre qui ont attiré l'attention de quelques géologues, elles s'expliquent tout aussi bien par le mode de cristallisation d'une grande masse, ou même par une transformation ultérieure, que par les conditions de la sédimentation : celle-ci étant parfaitement incapable de nous faire comprendre le dépôt de pyrite parfaitement homogène sur plusieurs centaines de mètres de haut.

D'autre part, nous ne pouvons voir non plus, dans ces gisements, des filons hydrothermaux. Ils n'ont pas, en principe, de racine profonde ; et c'est un fait de première importance industrielle qu'il faut s'attendre à la disparition des masses les plus volumineuses au bout de quelques centaines de mètres : les dimensions de l'ellipsoïde suivant l'inclinaison étant du même ordre que suivant la direction. On ne voit pas non plus ces cristallisations par zones concrétionnées, ces géodes, etc., qui sont si caractéristiques des filons hydrothermaux proprement dits. Il est extrêmement vraisemblable que la masse entière a dû cristalliser d'un seul bloc.

Dans ces conditions, la théorie que nous avons proposée plus haut en deux mots, consiste à assimiler les formations pyriteuses à des laccolithes de roches éruptives. Ce sont, pour nous, des solutions saturées sous pression qui, à une profondeur notable dans l'écorce, ont pénétré dans les baillements des schistes à mesure que les effets tectoniques faisaient s'entrebailler et s'ouvrir ceux-ci et qui, dans ce mouvement, ont injecté en se diffusant tous les interstices, si petits qu'ils fussent, des schistes, plans de joints ou cassures, comme ont pu le faire ailleurs les venues feldspathisantes, auxquelles est due la gneissification régionale. Cette comparaison précise la mesure dans laquelle nous croyons à une réaction ignée. Comme pour les granulitisations, nous pensons que l'action de la vapeur d'eau sous pression, des carbonates alcalins, etc., a dû contribuer puissamment à créer un état intermédiaire entre l'état fondu et l'état liquide, qu'il est assez difficile de préciser davantage, mais en raison duquel les sulfures avaient plus de mobilité et plus de facilités pour pénétrer dans des interstices très minces qu'une masse ignée proprement dite.

¹ Page 94.

Etant donné cette théorie et, d'autre part, la relation d'origine manifeste entre les amas pyriteux et les roches éruptives, certains géologues ont proposé d'y voir une simple différenciation magmatique des gabbros. Telle est la thèse soutenue dans le bel ouvrage récent de Beyschlag, Krusch et Vogt et défendue également par Stutzer. Ces géologues se sont attachés en conséquence à trouver des gabbros dans le voisinage de tous les gites pyriteux, et l'on a pu les accuser d'y mettre parfois un peu de parti pris.

A notre avis, la relation n'est pas du tout nécessairement aussi directe. Elle peut, comme nous l'avons dit en commençant, prendre de nombreuses formes intermédiaires entre la ségrégation magmatique et le départ filonien ; et, si le premier type est plus fréquent dans les plates-formes primitives, comme la Scandinavie, où nous observons aujourd'hui au jour des sections particulièrement profondes des chaînes plissées, plus on a affaire à des gisements d'un type récent et superficiel, plus on s'éloigne de la ségrégation pour se rapprocher du filon, comme dans les cas examinés plus loin de Boccheggiano, Gavorrano, etc.

CHAPITRE VI

GISEMENTS HYDROTHERMAUX. — I. DISPOSITION DU VIDE REMPLI

FORMES DES CASSURES. — 1° FRACTURES TECTONIQUES. — FILONS COMPOSÉS. — CHAMPS DE FILONS. — ACTION MÉCANIQUE DU TERRAIN ENCAISSANT. — 2° FISSURES DE RETRAIT. — 3° FILONS-COUCHES. — 4° GITES EN SELLES. — 5° CHEMINÉES. — 6° CHAMBRES, TUYAUX, CREVASSES ET GROTTES DANS LES CALCAIRES. — 7° RÔLE DES CONTACTS HÉTÉROGÈNES. — 8° IMPRÉGNATIONS STRATIFORMES. — 9° VIDES CREUSÉS PAR LES EAUX MÈMES. — SUBSTITUTIONS.

Depuis que nous avons commencé l'étude des gîtes métallifères, nous nous sommes progressivement écartés de la roche mère restée dans ses conditions initiales pour envisager un départ de plus en plus accentué des éléments métallifères utilisables et nous avons vu, en même temps, les réactions de voie ignée faire place peu à peu à des réactions plus complexes, qui participent déjà des solutions hydrothermales. Des inclusions et ségrégations, nous sommes passés ainsi aux départs immédiats, aux imprégnations diffuses de profondeur, aux amas pyriteux, etc. Nous arrivons maintenant à la catégorie de gisements qui constitue le cas le plus fréquent et qui a longtemps passé pour seule représentative de la métallogénie : aux filons de remplissage hydrothermal. Nous allons voir, à leur propos, que l'origine première de leur minéralisation est encore la même dans la grande majorité des cas et qu'il s'agit ici aussi de métaux empruntés à une roche ignée profonde par un phénomène solidaire de sa mise en place à l'état de fusion. Seulement le transport de ces métaux, au lieu de se faire à très faible distance par un magma igné en fusion, prêt à se solidifier dès que la température des parois encaissantes devenait plus basse, a pris ici la forme d'une eau chaude, ou au moins d'une vapeur apte à se condenser en eau ; et cette solution métallifère a pu s'introduire dans les vides de forme quelconque que lui offrait l'écorce jusqu'à des distances parfois très grandes de son point de départ. Il en résulte que, dans l'étude d'un tel gisement, nous devons envisager successivement plusieurs questions : d'abord la disposition du vide incrusté ; puis l'origine du remplissage, les raisons de sa précipitation et son mode de dépôt. Ce chapitre sera consacré au premier côté plus mécanique de la question et le suivant aux phénomènes chimiques dont résulte le dépôt des minerais.

ÉTUDE DES FRACTURES INCRUSTÉES

Quand on envisage les faits dans leur généralité, il est facile de concevoir qu'un vide de forme et d'origine quelconques, situé dans le rayon

d'action des fumerolles métallisantes, a pu donner lieu à un gîte d'incrustation hydrothermale, ainsi que nous en avons déjà eu des exemples probables pour d'autres modes de remplissage dans les dépôts immédiats, les imprégnations diffuses et les amas pyriteux. Le cas est tout à fait assimilable à celui des eaux souterraines, dont nous savons les allures extrêmement variées ; et l'étude de telles eaux, qui est le point de départ nécessaire pour procéder à l'examen des filons, montre que l'on peut rencontrer des sortes de ruisseaux souterrains affectant toutes les dispositions depuis le réseau dispersé dans un plan horizontal, auquel on donne communément le nom de nappe, jusqu'aux fractures verticales qualifiées de filons. Nous consacrerons, en effet, la seconde partie de ce chapitre à divers cas particuliers de vides métallisés¹. Mais l'opinion vulgaire, fondée sur la pratique, suffirait seule à nous avertir que la forme qualifiée de filon, forme pouvant d'ailleurs elle-même varier beaucoup, est la plus répandue. Quand on pense à un gîte métallifère, c'est d'abord un filon qu'on se représente ; et ce sont ces filons que nous allons d'abord étudier.

Qu'est-ce qu'un filon ? Quoique la notion soit familière à tous, nous donnons ici (fig. 8) la représentation d'un affleurement filonien, montrant comment, dans la pratique, les choses peuvent apparaître à la surface. Au milieu de terrains ou roches quelconques, affleure au jour un banc plus ou moins large, le plus souvent quartzéux et reconnaissable alors immédiatement à sa couleur blanche : banc, dans lequel on peut s'enfoncer, suivant l'inclinaison de cette sorte de mur qui constitue le filon, jusqu'à la profondeur où s'arrêtent, pour des raisons techniques, nos travaux miniers². Comment s'est ouverte la fracture ainsi incrustée ? Généralement par une dislocation de l'écorce, pouvant avoir été accompagnée d'un rejet des terrains encaissants et constituant alors une faille. Etant donné que les régions affectées par les phénomènes ignés sont, en même temps, pour la plupart, très disloquées, on conçoit comment les eaux métallisées, dont l'origine est dans ces roches ignées, ont d'ordinaire trouvé à leur portée de telles cassures filoniennes, souvent presque verticales, qui, par leur ouverture béante, par leur continuité en profondeur, par leur redressement habituel, ont offert des conditions particulièrement favorables à la circulation ascendante des eaux. Surtout dans les terrains durs, homogènes, massifs, comme des granites ou des gneiss, les fentes de dislocation formaient, jusqu'à la surface, à peu près la seule issue accessible aux eaux thermales.

Ces fractures filoniennes, à leur tour, nous allons être amenés à les subdiviser ; et, quoique notre intention ne soit pas ici d'examiner en détail ce côté mécanique du problème, qui a été minutieusement traité dans beaucoup d'ouvrages classiques³, nous distinguerons en quelques mots : les fractures tectoniques (pouvant elles-mêmes être plus ou moins compliquées), les champs de filons qui représentent le groupement de tels filons,

¹ Toute l'étude que j'ai donnée autrefois des fissures thermales (*Sources thermominérales*, p. 43 à 80) s'applique également aux filons métallifères.

² On s'imagine parfois à tort qu'un filon est nécessairement à peu près vertical. Ce cas est fréquent ; mais on peut rencontrer aussi, comme le montre la fig. 8, des inclinaisons quelconques, surtout lorsque le filon passe à un filon-couche.

³ Voir, notamment, mon petit livre sur la *Formation des Gîtes métallifères*, 2^e édit., p. 71 à 99.

les fissures de retrait, les diaclases intérieures des roches, etc. Après quoi, nous passerons aux contacts hétérogènes, aux filons-couches, aux imprégnations stratiformes, aux substitutions, etc. Etant donné l'importance pratique que présente la continuité d'un filon métallifère, les mineurs

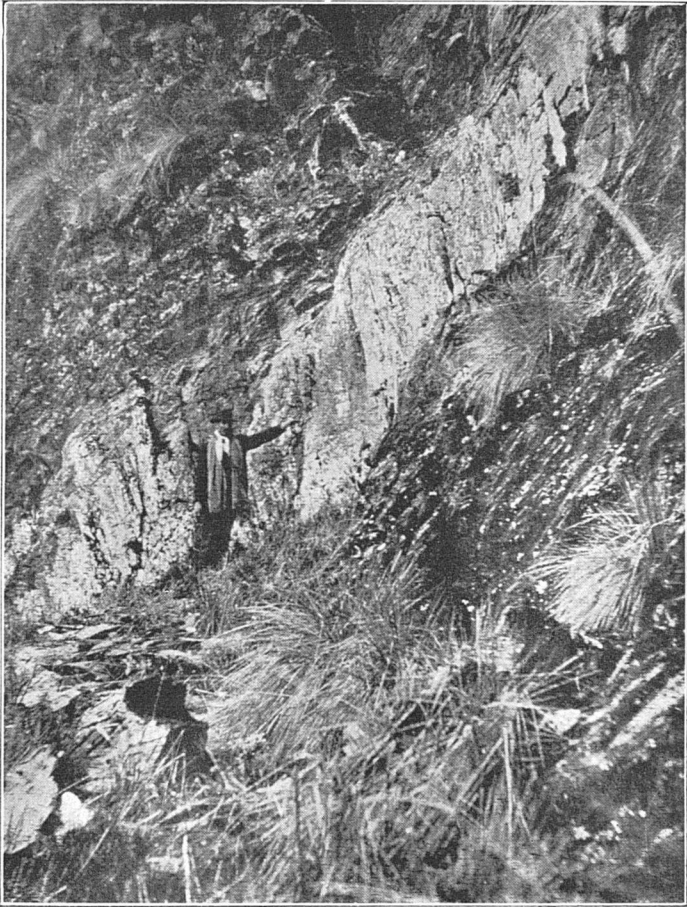


Fig. 8. — Affleurement d'un filon de quartz aurifère peu incliné à Pallaya, Andes Orientales, près de Yani, d'après M. Armas.

anglais ont adopté une division très catégorique entre les vrais filons (true fissure vein) qui se prolongent en profondeur et les faux filons, de tous genres, qui n'ont pas de continuité.

1° FRACTURES TECTONIQUES

Prenons d'abord les *vrais filons*, ouverts par une dislocation du sol sous l'influence d'un mouvement tectonique.

Localisation des filons. — De tels filons, qui supposent une cassure franche, nette et continue, se présentent, en principe, beaucoup plutôt dans les zones de l'écorce terrestre ayant été affectées de déplacements verticaux que dans celles où se sont produits les plissements avec intervention de forces tangentiellles et horizontales. Ce sont, en même temps, les régions qui se sont le mieux prêtées au déplacement des magmas ignés internes et où, par suite, les émanations métallisantes ont eu le plus de chances de se produire. Nous les trouverons donc peu dans l'axe même des plissements (à moins qu'ils ne remontent à une période antérieure, comme cela paraît se produire dans quelques gites des Alpes), tandis qu'ils deviennent nombreux, quand on atteint les avant-pays, où le contre-coup des plissements a pu déterminer des fractures verticales. Ils se multiplient également sur le bord de ces ellipses d'effondrement, qui interrompent la continuité des zones plissées : par exemple, autour de la plaine hongroise, de la Méditerranée occidentale ou de la mer Tyrrhéniennè, et, en beaucoup plus grand, sur les côtes américaines ou japonaises du Pacifique. La périphérie des horsts, qui ont été soumis à des mouvements alternatifs en haut et en bas, est souvent suivie par de nombreuses fractures cristallisées, ainsi que le pourtour des grandes amandes cristallines intercalées dans les schistes. Enfin, des conditions particulièrement favorables paraissent avoir été réalisées, là où de vastes plateaux tabulaires se sont trouvés divisés en compartiments juxtaposés, qui ont pu subir des déplacements relatifs de plusieurs kilomètres dans le sens vertical, comme au Colorado et au Mexique.

Dimensions des filons. — Les fractures métallisées sont quelquefois simples et continues. Pour envisager d'abord les cas extrêmes, on connaît d'assez nombreux exemples de filons poursuivis sur près de 100 km. de long, et le Motherlode de Californie, connu sur 112 km., en est un cas fameux à cause de sa richesse; mais le Plateau Central, ou la Bohême, présentent des décrochements simplement quartzeux, dont les dimensions sont presque comparables¹. D'autres filons-failles célèbres, comme celui du Comstock en Nevada, n'ont que 3 ou 4 km. de long, mais une largeur considérable, qui atteint une centaine de mètres dans la partie centrale. Enfin, il n'est pas rare de suivre un filon en direction sur plusieurs kilomètres, et une longueur de 1 kilomètre est tout à fait normale.

En profondeur, on est descendu dans plusieurs à 800, 1000, 1500 m., sans en trouver la fin [1 250 m. à Bendigo, 1 150 m. à Przibram, 850 m. dans l'Ober Harz, etc.].

Leur largeur atteint fréquemment 10 et parfois 50 m., souvent il est vrai à l'état de filon composé, ou réseau de veinules disséminées dans une roche minéralisée, ou encore de filon-faille à moitié rempli par une brèche de débris empruntés aux parois. Cependant, anticipant sur la question du remplissage, nous remarquerons aussitôt que,

¹ J'en ai autrefois étudié un à Evaux, dans la Creuse, dont les parties latérales renferment de la pyrite aurifère.

dans ces grands filons, la distribution du minerai est toujours localisée suivant des lentilles ou colonnes (shoots) et que le remplissage comprend, en coupe comme en direction ou en inclinaison, une grande prédominance de gangues. Mais, laissant de côté la différence pratique entre le minerai et la gangue pour ne considérer qu'un vide incrusté de dépôts, on s'est parfois demandé comment ces immenses crevasses avaient pu subsister ouvertes en résistant à la pression des terrains encaissants assez longtemps pour permettre les dépôts hydrothermaux¹. Certains ont alors invoqué la force de cristallisation (Crosby, Dunn, Becker), d'autres (Graton) la pression interne des eaux magmatiques, analogue à celle qui a permis l'intrusion à grande distance des pegmatites. Il faut se rappeler, en outre, que tous ces vides sont composés, non, comme on se l'imagine trop, de deux parois parallèles équidistantes, mais de deux surfaces gauches et ondulées s'arc-boutant l'une sur l'autre par tous leurs points de contact. On arrive de plus, par bien des arguments, à l'idée que les fractures une fois formées n'ont pas mis longtemps à se remplir : qu'elles l'ont fait, en tout cas, dans la même période géologique, comme je crois l'avoir démontré pour les sources thermales actuelles, dont les fractures remontent toutes à une période de dislocation récente².

A côté de tels filons exceptionnels, le cas tout à fait normal est celui d'un filon de 0,10 m. à 1 m. d'épaisseur, suivi en direction sur 500 à 1 000 m. et, en inclinaison, suivant une longueur comparable. C'est, d'ailleurs, un fait d'expérience, très logiquement explicable, que les dimensions suivant l'inclinaison sont comparables à celles suivant la direction, les deux limitations étant du même ordre. Les filons, dont l'affleurement est très prolongé, ont, en même temps, souvent des chances pour se poursuivre en profondeur.

Enfin, comme cas extrême inverse, il arrive de rencontrer des filons très minces, à peine épais comme une feuille de papier (des feuillets ou Blätter), dont l'existence parfois continue sur plusieurs centaines de mètres de haut (du moins si on considère leur faisceau), soulève un problème mécanique encore plus difficile peut-être que celui des crevasses très vastes.

Salbandes, Brèches, Torsions, Stries, Filons composés, etc. — Si on examine une de ces fractures tectoniques en un point quelconque, on est presque toujours frappé par l'allure bréchiforme de son remplissage. On constate que la fracture, telle que nous la voyons, ne s'est pas ouverte d'un coup, mais par épisodes successifs, au milieu desquels ont pu s'intercaler des minéralisations successives. Il en résulte qu'à diverses reprises un premier remplissage a pu être redisloqué et ses fragments recimentés par un remplissage nouveau ; ce qui permet alors de déterminer dans quel

¹ HEIM, en étudiant les lois de la déformation des roches (*Mechanismus der Gebirgsbildung*, t. 2, 1878), est arrivé à l'idée que jusqu'à 3.000 m. de profondeur, une fracture remplie d'eau pourrait parfaitement résister à la pression latérale. J'ai montré autrefois, dans mes *Sources thermales*, p. 23 à 25, que la pression croissante à laquelle est soumise une colonne d'eau filonienne suffit, jusqu'aux plus grandes profondeurs, à empêcher sa vaporisation.

² *Sources thermo-minérales*, p. 213 à 231.

ordre se sont déposés les remplissages successifs. Presque toujours ces dislocations ont été accompagnées d'un déplacement relatif entre les deux parois, déterminant une faille.

C'est à ce glissement que sont dus, sur les deux parois, les liens argileux qui forment souvent les *salbandes* le long des *épontes*. C'est lui également

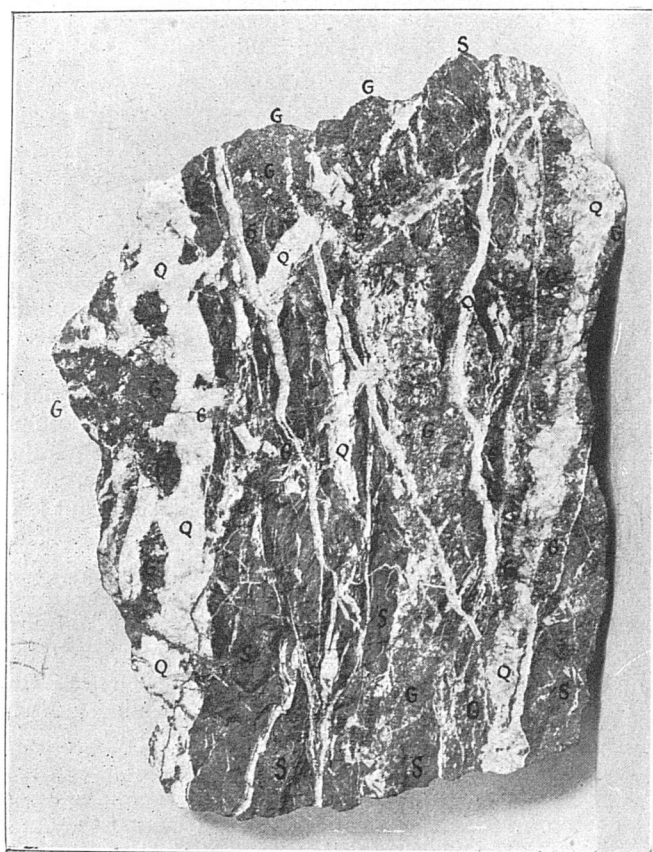


Fig. 9. — Type de filon composé à veines de quartz (Q), et galène (G) dans un schiste (S)

qui a parfois rempli le filon de débris amincis ou arrondis, formant *brèche de friction*, qui ailleurs a déterminé, sur de tels fragments, des *torsions* ou des *stries*, qui ailleurs encore a rempli la fente d'une poussière argileuse ultérieurement minéralisée. Quand le mouvement, postérieur au remplissage, a fait glisser l'une contre l'autre deux parties déjà métallisées, il en est résulté des faces polies que l'on nomme *miroirs*, *cuirasses*, etc.

L'examen local d'un filon montre encore qu'au lieu d'incruster une grande fracture, les eaux ont souvent pénétré dans toute une zone de roche fissurée, crevassée en tous sens, dessinant un écheveau de minéra-

lisation dans une roche. C'est ce que l'on appelle un *filon composé*, dont notre figure 9 donne un exemple dans le cas très simple d'un réseau de veines de calcite et dont le fameux Motherlode californien constitue un cas remarquable. Ces réseaux sont parfois si complexes que certains auteurs ont été amenés à considérer l'imprégnation comme ayant joué un rôle supérieur à celui de l'incrustation. Ils peuvent passer à des *stock-works*, qui en constituent l'exagération. Ils peuvent aussi être remplacés par un système plus simple de deux ou plusieurs fissures parallèles reliées par quelques veinules transversales.

Limitation en direction et en inclinaison, ramifications, champs de filons.

— Si, au lieu de considérer le filon en un point particulier, on le suit dans sa longueur, on s'aperçoit vite qu'à de très rares exceptions près, ce filon n'est ni rectiligne ni continu, comme on le suppose souvent d'après certaines définitions théoriques. Un filon, par le fait seul qu'il offre un commencement et une fin, n'est jamais qu'une lentille ou un disque plus ou moins allongé : lentille, dont la direction générale dessine parfois un arc de courbe, comme celui dont on a essayé sans succès de calculer la forme théorique et de retrouver ainsi l'origine au Comstock ; et cette courbure fréquente est en faveur d'une cassure par torsion, telle que celle reproduite dans les expériences de Daubrée. Sa limitation en direction est immédiatement visible quand on essaye de suivre un affleurement. Suivant la verticale, les vieux mineurs allemands parlaient volontiers d'une profondeur indéfinie (*ewige Teufe*) et, pour bien des raisons psychologiques, on considère souvent encore qu'un véritable filon a plus de chances pour s'enrichir en descendant que pour disparaître. Ailleurs on professe, au contraire, qu'à une certaine profondeur tous les filons se coincent ou cessent d'être exploitables. La vérité paraît être intermédiaire : les dimensions verticales possibles d'un filon pouvant être supérieures à toutes celles qu'atteignent nos travaux. Bien des fois, après s'être arrêté sur une zone d'appauvrissement pour des raisons industrielles, on a retrouvé plus bas une zone riche. Néanmoins, nous développerons plus loin cette idée que le type filonien a occupé une zone d'extension limitée dans l'écorce terrestre, n'ayant en principe ni atteint la surface au moment où il s'est formé, ni, bien entendu, continué au dessous de la zone où commençait alors la fusion des roches. Il peut donc arriver, en raison de l'érosion ultérieure, que notre affleurement actuel soit peu éloigné de cette limitation théorique par en bas.

L'affleurement d'un filon est presque toujours sinueux, souvent composé de tronçons disjoints, sujet, en coupe comme en plan, à des bifurcations, qui parfois se terminent en cul-de-sac¹, qui, ailleurs se prolongent autant que le filon principal, qui, ailleurs encore, après avoir décrit une courbe, vont se réunir de nouveau à celui-ci (*Gefährte*)².

Dans son ensemble, lui-même se termine en direction, soit par un éparpillement, soit par un coinement ; et le même fait se produit parfois suivant l'inclinaison.

¹ Voir (fig. 451) notre plan du Comstock.

² Voir la coupe de Nundydroog dans l'Inde, fig. 10, p. 112.

Il arrive que certains filons se ramifient, se dispersent et se perdent ainsi en profondeur. Ainsi le puissant filon Neue Hofnung Gottes de Braunsdorf commence, vers 300 mètres, à se ramifier en une série de veines, qui se bifurquent à leur tour de plus en plus. On observe le même fait sur la coupe du filon de Grand-Clot (fig. 380). Inversement, on a vu des filons commencer par un faisceau de veines, qui l'enrichissement superficiel aidant, leur donnait d'abord une largeur extraordinaire. La

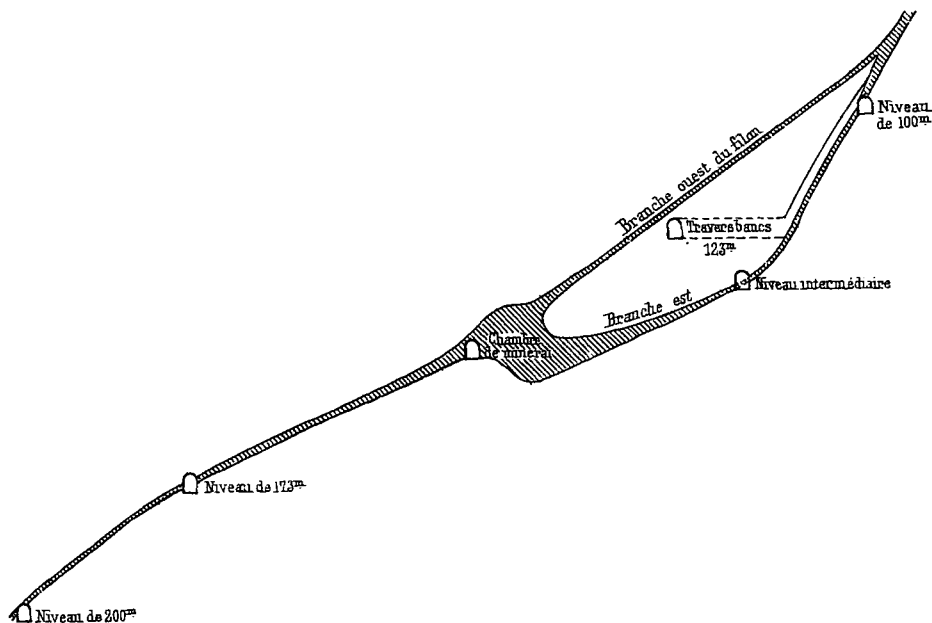


Fig. 10. — Coupe verticale d'un filon présentant une bifurcation arquée dans la mine Nundydroog (champ d'or de Kolar), d'après F.-H. Hatch.

coupe du Comstock montre un large filon ramifié ainsi en haut comme en bas (fig. 451 à 453).

Enfin, dans la plupart des cas, un filon n'est pas unique, mais dépend d'un ensemble composé, soit de fractures parallèles, soit d'un système compliqué, qui constitue un *champ de filons*. Les nombreux plans de régions minières que nous donnerons montreront assez ces dispositions diverses. Je renvoie, par exemple : aux plans de Przibram (fig. 373) pour un faisceau de filons parallèles assez simple ; aux faisceaux plus multipliés mais encore singulièrement parallèles de Berezovsk (fig. 510), Kolar (fig. 514), Wainad (fig. 516), Ballarat (fig. 518), Bendigo (fig. 519), etc. ; aux systèmes déjà plus complexes du Harz (fig. 363), ou de Linares (fig. 351) ; enfin aux dislocations tout à fait compliquées de Freiberg (fig. 368), Annaberg (fig. 470), Joachimsthal (fig. 153), Vialas (fig. 362), du pays de Siegen (fig. 202), etc.

Il suffit, d'ailleurs, d'examiner en détail un système de failles sur le bord d'un horst en notant, non seulement les affleurements, mais aussi les

hauteurs et les sens de rejet, comme je l'ai fait autrefois à propos du massif de Saint-Saulge¹, pour comprendre comment des eaux métallifères, venant à circuler dans un tel système de failles, produiraient un champ de filons compliqué. On explique, en même temps, comment un tel système offre nécessairement une extension limitée suivant la cause qui l'a produite : ce qui entraîne ces singulières accumulations de filons sur un point tandis que les régions voisines en sont exemptes.

Cassures dans un milieu homogène. — L'origine de ce système d'accidents est double. Il faut d'abord considérer les cassures produites dans une masse homogène par un effort d'écrasement, de torsion, de flexion oblique, etc. C'est ce qui a pu se produire dans certains grands massifs de granite ou de gneiss et c'est ce que Daubrée a essayé de reproduire dans ses expériences classiques. Freiberg et Vialas (fig. 362 et 363) rappellent beaucoup la figure obtenue par Daubrée en tordant une glace et l'on y retrouve les mêmes faisceaux divergents à partir des sommets successifs d'un dessin en dent de scie. La figure d'Annaberg (470) se rapproche davantage de ce qu'on obtient par une pierre lancée contre une glace, c'est-à-dire par un effort de pression localisé exerçant une action périphérique.

Ailleurs des faisceaux de nombreux filons parallèles se rencontrent, au contraire, avec une régularité qui, vue sur un plan, pourrait d'abord paraître conventionnelle². On imagine alors volontiers un effort d'extension s'exerçant sur une certaine longueur perpendiculairement à la direction moyenne des filons. Il a pu en résulter le glissement successif d'une série de blocs aplatis les uns sur les autres, comme lorsqu'on fait glisser un jeu de cartes et, par suite, une courbure presque théorique des diverses cassures, qui apparaissent seulement rectilignes lorsqu'on les envisage sur une longueur restreinte, mais se courbent en réalité à leurs deux extrémités. Et, en même temps, ces extrémités sont sujettes à se disperser en un écheveau de veines plus minces.

Influence mécanique du terrain encaissant. — En dehors des complications qui peuvent se produire dans un milieu homogène, il faut bien remarquer que, dans la presque totalité des cas, les terrains traversés par une fracture sur sa longueur ou sa profondeur ne sont pas homogènes et que cette diversité de conditions physiques rencontrées par une même direction d'effort entraîne, pour celle-ci, des effets variés.

En principe, une grande fracture tectonique pourra, par exemple, traverser tour à tour du granite, des schistes, des grès, des calcaires³. Dans chacun de ces terrains, elle prendra un aspect différent, sauf à revenir à son aspect primitif si, dans une région formée de bandes zonées, elle retrouve ensuite de nouveau le genre de terrain primitif.

La nature des roches que traverse un filon ne peut manquer d'avoir

¹ 1895. L. DE LAUNAY. *Le massif de Saint-Saulge et ses relations avec le bassin houiller de Decize* (Bull. Serv. carte Geol., n° 46, pl. 1). Voir également plus loin les filons-failles de la région de Boccheggiano (fig. 319).

² On retrouve l'équivalent pour certains faisceaux de filons ignés : microgranites du Plateau Central sur la feuille de Gannat, diabases de Bretagne, etc.

³ Voir, par exemple, les plans de Prizibram (fig. 373), Linarès (fig. 351), du Sarrabus (fig. 475), etc.

une influence sur ce filon. Cette influence, que nous rencontrons ici pour la première fois, peut (et c'est le seul point à examiner dans ce chapitre) tenir d'abord aux facilités plus ou moins grandes qu'a rencontrées la fracture en s'ouvrant ; elle peut, en outre, dépendre de l'action précipitante variable qu'ont pu exercer les éléments chimiques ou les conditions physiques de la roche. Enfin, plus directement, la roche elle-même a pu fournir des éléments au filon, soit par un départ igné immédiat, soit par une action de sécrétion latérale postérieure.

Cette influence du terrain encaissant, que nous envisageons ici mécaniquement et tout à fait indépendamment du remplissage sur lequel elle a pu s'exercer ensuite d'autre sorte, est souvent très nette. Mais, à côté d'observations ayant une portée générale comme le rôle des schistes ou des calcaires, il en est d'autres dont la valeur est plus locale et qu'il serait parfois imprudent d'étendre au delà de la région où on les a faites. C'est ainsi que, suivant les pays et parfois même suivant les filons d'un pays, un *granite* paraîtra une roche encaissante, ou tout à fait défavorable, ou excellente.

Ainsi, dans le district de Linarès en Espagne, deux filons voisins, qui traversent à la fois le granite et les schistes, s'appauvrissent : l'un, en passant dans le granite ; l'autre en passant dans les schistes.

Sauf cette réserve, on remarque, à peu près partout, que lorsqu'une fracture arrive dans des *schistes*, ou *marnes schisteuses*, surtout si elle est faiblement oblique sur leur direction, elle a une tendance à s'éparpiller en veinules conformes à la stratification. C'est une des raisons, pour lesquelles les fractures, qui peuvent parfois se produire dans des zones récemment plissées dont les terrains meubles ont échappé au métamorphisme régional, sont souvent très irrégulières et discontinues. Souvent, les réactions d'altération étant plus tard intervenues, on voit, par exemple pour le fer, un gisement, très développé dans les calcaires, devenir inexploitable en atteignant les schistes. Parfois aussi, les baillements profonds de schistes ont donné lieu à de grands amas pyriteux, comme ceux du Rio Tinto précédemment étudiés.

Dans les *calcaires*, le phénomène qui se produit est différent. Ces terrains sont, pour la plupart, divisés par des diaclases intérieures normales aux bancs. Il en résulte une tendance à la dispersion des eaux métallisantes suivant ces diaclases, notamment suivant les colonnes d'enrichissement produites par leurs intersections, ou encore, comme nous le verrons plus loin, suivant leurs contacts avec des terrains imperméables. Mais, dans les calcaires, cette dispersion première peut être compensée et masquée par des remises en mouvement, entraînant par substitution la constitution de gîtes en amas (zinc, fer, manganèse, cuivre, etc.).

On rencontre, dans ce cas des calcaires : 1° les gîtes de contact éruptif à type Banat, à gangue silicatée ; 2° les diaclases incrustées telles que les filons d'or de Malmani, les filons d'étain de Campiglia, de Chongkat Pari, du Laos ; 3° les zones de calcaires métallisées (Silésie) ; 4° les gisements de contact, types Laurion, Leadville ; 5° les gîtes de substitution carbonatée ; 6° les altérations oxydées superficielles.

Un *grès* offre d'ordinaire des conditions plus favorables, quand il n'est pas assez poreux pour qu'il y ait imprégnation. Mais souvent, dans un tel

grès, la cassure, qui arrive obliquement à la strate, tend à se recourber normalement à celle-ci. C'est le contraire de ce qui se produit dans les schistes, où elle épouse la direction.

Il peut encore arriver que certaines roches trop dures se soient mal prêtées à l'ouverture de cassures, ou que les deux lèvres trop nettes de la fissure se soient alors refermées. Nous verrons, par exemple, au Sarrabus, un filon se coincer à la traversée d'une microgranulite pour reparaitre ensuite. Dans l'une des mines de Freiberg, au David Richtschaft, on voit de même un filon, très net dans le gneiss, s'éparpiller en une quantité de veinules quand il entre dans une microgranulite. Les elvans du Cornwall produisent aussi un effet analogue, qu'il ne faudrait pas croire pourtant général.

On retrouve une influence analogue pour des diabases (toadstones) interstratifiées dans les sédiments du Derbyshire et à la traversée desquelles s'appauvrissent les filons : peut-être aussi dans le cas, discuté plus loin, des gisements d'argent de Chañarcillo au Chili, où un filon traverse alternativement des mélaphyres et des calcaires, appauvri dans les premiers, enrichi dans les seconds. Mais, ici, des influences d'altération postérieure ont pu intervenir.

En général, les meilleures fractures se rencontrent dans les roches moyennement dures, qui n'ont été, ni trop résistantes pour s'ouvrir, ni trop friables pour rester ouvertes.

Ce sont ces diverses observations, assez simples et naturelles en elles-mêmes, qu'on a essayé de codifier en lois, dont je rappelle seulement l'énoncé : 1° Les parties riches d'un filon traversant des terrains variables sont celles où la fente est encaissée dans des strates de dureté moyenne ; 2° les parties les plus riches d'un filon sont celles où l'inclinaison est la plus voisine de la verticale (parce qu'il s'y est ouvert des chambres plus vastes, au lieu que, dans les parties peu inclinées, le toit a glissé sur le mur) ; 3° dans un même filon qui, en traversant des strates inégalement résistantes, est devenu sinueux, les parties riches forment des éléments parallèles d'une orientation définie.

2° FISSURES DE RETRAIT

Sauf dans quelques cas particuliers, la catégorie de gîtes que nous mentionnons dans ce paragraphe paraît être plus théorique que pratique, au moins quand il s'agit de gisements offrant une certaine extension. En théorie, on conçoit parfaitement qu'une roche ignée, susceptible de donner des vapeurs métallisantes, ait pu, en se refroidissant, se contracter comme une argile qui se dessèche et donner lieu à des fissures, dans lesquelles se sont alors localisées les eaux chargées de métaux. Nous allons en citer quelques exemples, notamment dans le cas des métaux les plus directement associés aux roches acides, comme l'étain, le cuivre, l'or. Mais, presque toujours, quand on examine avec un peu de soin des fissures qui, au premier abord, semblaient attribuables à ce phénomène, on les voit se prolonger dans les terrains encaissants et participer, par conséquent, des fractures tectoniques. Pratiquement, ce qui distingue les fissures dont il s'agit, c'est leur peu de continuité, leur limitation rapide en tous sens,

leur éparpillement dans un massif de granulite, d'andésite, de rhyolite, etc. Souvent aussi leur type de minéralisation est spécial et laisse supposer des vapeurs particulièrement chaudes et actives.

Parmi les cas, où l'idée d'un retrait est la plus vraisemblable, je citerai surtout des cas de filons stannifères. Nous verrons plus tard, à Zinnwald, en Saxe, un exemple très remarquable de dôme granitique englobé dans un porphyre quartzifère : dôme qui a été découpé par une série de cassures grossièrement parallèles à sa surface extérieure et dessinant, par suite, des filons plats, comme une suite de cuvettes emboîtées les unes dans les autres. Ces filons, épais de 0,10 m. à 0,75, sont séparés par des intervalles d'une dizaine de mètres. Même dans ce cas, il est cependant remarquable que les filons pénètrent dans le porphyre encaissant, où ils s'appauvrissent rapidement. Il y a donc eu un mouvement plus général qu'un simple retrait.

On peut en rapprocher, avec les mêmes réserves, d'autres gisements stannifères, où l'on a, presque exclusivement dans la granulite elle-même, des faisceaux d'innombrables veinules minces, ayant souvent à peine l'épaisseur d'une lame de couteau, et rendant la roche exploitable dans toute sa masse (Altenberg, etc.). Il est possible que la contraction de la granulite ait été le point de départ d'un mouvement de dislocation ; mais celui-ci a dû prendre vite un caractère différent.

D'autres cas assez nets de fissures de retrait sont fournis par les filons en échelons qui recourent transversalement certains filons de roche ignée, en en sortant à peine pour se coincer aussitôt dans le terrain encaissant. Les cas les mieux connus de ces filons en échelle sont ceux de Berezovsk dans l'Oural, de Wawerley en Victoria (dans les deux cas, pour des filons d'or), ou encore certains filons de chalcopyrite du Telemark (Näsmark).

Enfin, on a quelquefois rattaché au même ordre d'idées certains filons aurifères de Transylvanie, qui forment l'éventail dans des trachytes (fig. 546) ; mais là, plus encore que dans les exemples précédents, le système filonien se prolonge dans les terrains éocènes voisins, et l'on peut se demander si un mouvement de fracture général, ayant pu d'ailleurs contribuer à l'intrusion ignée, n'a pas seulement pris une allure particulière dans la roche éruptive, encore incomplètement refroidie.

3° FILONS-COUCHES

Les vides, ouverts dans le sol par un accident mécanique et susceptibles d'avoir été métallisés, sont loin de se limiter à la forme des fractures à peu près verticales et plus ou moins prolongées qui constituent les filons ou les fissures de retrait. Nous avons annoncé que toute autre forme de vide avait pu se prêter au même phénomène et nous allons en examiner quelques cas.

Le plus fréquent de tous, que nous rencontrerons souvent, mais dont la description peut se donner en deux mots, est celui auquel on donne le nom de filon-couche. Souvent, dans un ensemble de terrains stratifiés et, spécialement, dans une masse schisteuse, le simple décollement de deux

bancs a laissé entre elles un vide, dans lequel les eaux ont pu s'introduire et qui s'est transformé ainsi en une sorte de strate métallisée, parfois difficile à distinguer des minerais sédimentaires, contemporains du dépôt. Cependant de tels gisements sont, en principe, beaucoup plus limités comme extension, à moins qu'à quelque distance ils ne passent à un filon proprement dit.

Nous examinerons bientôt, dans les calcaires et dans les grès, deux types de gisements donnant à peu près la même allure : les gisements de contact hétérogène et les imprégnations dans les grès ou conglomérats.

4° GISEMENTS EN SELLES, OU POCHEs ANTICLINALES ET SYNCLINALES

Nous venons de supposer le filon-couche s'introduisant entre deux plans schisteux décollés, mais restés à peu près plans et parallèles l'un à l'autre. Il peut également arriver souvent que ce décollement ait été facilité par le plissement des schistes. Il en est résulté des sortes de poches, portant surtout sur les anticlinaux, un peu aussi sur les synclinaux, dans lesquelles ont pu se constituer des lentilles limitées formant des zones allongées suivant la direction même du plissement. C'est à Bendigo, en Australie, dans un ensemble de schistes et de grès siluriens, qu'on a reconnu les plus caractéristiques de ces gisements en selles, et nous en donnerons, à leur propos, une description détaillée (fig. 520 à 522). Avec des dimensions plus vastes, on a considéré les gîtes d'argent de Broken Hill, en Australie, comme représentant aussi un gisement en selle. Il faut remarquer que, sous une forme un peu spéciale et avec une richesse exceptionnelle, ces gisements se rapprochent de ce que nous avons appelé plus haut des imprégnations diffuses. Le phénomène qui a produit ces filons d'or ou d'argent ressemble, en plus grand, à celui dont résultent toutes les lentilles pyriteuses des terrains cristallophylliens et même les amas pyriteux produits par un baillement accentué des schistes. Mais, — et c'est là une différence importante —, de telles formes exceptionnelles s'associent, dans ces régions à minéralisation riche, avec toute la série des autres types filoniens.

Par exemple, les études faites sur les filons d'or de l'Australie orientale ont conduit à y distinguer côte à côte des catégories très diverses, qu'il peut être utile de signaler ici à titre d'exemple.

On a là d'abord des filons réguliers, pratiquement indéfinis en profondeur, larges presque de 10 m., pouvant en direction être suivis sur plusieurs kilomètres, avec colonnes d'enrichissement (shoots) disposées suivant la règle ordinaire que nous étudierons plus loin.

Puis viennent des filons composés, ou faisceaux de cassures voisines, très minces, très limitées en direction et en profondeur, qui, en même temps, sont d'ordinaire faiblement inclinées et qui ne donnent lieu qu'à des lentilles minéralisées restreintes (flat veins de Bendigo.)

Un autre type fréquent est là celui des filons-couches interstratifiés, ou leaders, que l'on nomme aussi bedveins ou backs. Ces filons-couches suivent d'ordinaire un décollement de deux strates, une diastrome avec faille et remplissage argileux.

Enfin, on a le type très spécial à l'Australie des gites en selle ou saddle reefs, dans lesquels le décollement s'est fait au sommet d'un anticlinal. Ces poches passent aux inverted reefs quand elles sont à la base d'un synclinal. La partie supérieure d'une saddle est le cap ou apex, les flancs sont les legs¹.

Dans certains cas, on observe encore des cassures secondaires, analogues aux flat veins des filons verticaux, mais accompagnant les filons stratifiés. Le glissement d'une strate a pu, en effet, amener, dans les strates adjacentes, des cassures, généralement normales aux strates dans les grès, mais différemment inclinées dans les schistes. Cela s'appelle un *nake of spurs*. Quand ces fissures partent d'une poche anticlinale, ou main reef, elles forment les *feeders*. Enfin, si le gîte de fissures est indépendant d'un gîte principal exploitable, on l'appelle *stockwerk*.

Un dernier type australien est encore dit *lode*. Ce sont des couches de grès ou de schiste, où le nombre des cassures minéralisées est tel que toute la couche devient exploitable. Il s'est produit là une sorte d'imprégnation.

5° REMPLISSAGE DE CHEMINÉES

Parmi les cas particuliers que peuvent présenter les vides métallisés des régions éruptives, nous citerons le fait rencontré à Cripple Creek, au Colorado, d'une cheminée verticale imprégnée par des minerais aurifères. A la mine Anna Lee de Portland, on a pu suivre, sur 300 m. de haut, en plein basalte, une cheminée d'explosion de 4 à 6 m. de large, pleine de fragments basaltiques cimentés par du tellure d'or et de la calcite ferrugineuse. On est là dans une région de volcanisme presque superficiel, où la métallisation a pris évidemment toute la complexité d'allures qu'on pouvait attendre d'eaux chaudes pénétrant dans un terrain ouvert et disloqué en tous sens par l'éruption.

Dans un cas différent, on a exploité, à White Knob, en Idaho, un singulier gisement ayant la forme d'un tronc d'arbre avec ses branches² : tronc formé de gangues silicatées avec minerais cuprifères et englobé dans un porphyre quartzifère qui traverse un calcaire en le métamorphisant. Ici encore, l'intervention des roches ignées paraît avoir été très directe, et on peut supposer que la minéralisation a porté sur des enclaves calcaires englobées par le porphyre, en profilant de leurs fissures. La fluorine, qui apparaît ici comme à Cripple Creek, accuse, dans les deux cas, des fumerolles très actives.

Dans des conditions très différentes, il est arrivé de rencontrer, en terrains calcaires, des sortes de puits ou d'avens métallisés. L'un des plus curieux est celui d'Ojuela à Mapimi (Mexique), qui, avec un diamètre atteignant 40 m., est descendu presque verticalement à 650 m.

Nous avons également cité plus haut le cas d'Ella, au Mexique, où un calcaire a été transformé en oxy dans une cheminée verticale.

¹ Voir au tome 3 les figures 520 à 522 représentant les gites de Bendigo.

² Voir plus haut, p. 87, les gisements de chalcopryrite et magnétite au contact des roches éruptives et des calcaires.

6^o CHAMBRES, TUYAUX, CREVASSES, GROTTES, ETC., DANS LES CALCAIRES

C'est surtout dans les calcaires que les systèmes de fissurations suivies par les eaux métallisantes sont compliqués et peuvent aboutir à des apparences bizarres. Cette complication se trouve là accentuée par deux phénomènes dont nous parlerons ensuite : d'abord l'action dissolvante que les eaux métallisantes elles-mêmes ont pu exercer autour des fractures génératrices, grâce à l'acide carbonique dont elles étaient chargées ; ensuite l'effet, toujours très prononcé dans les calcaires, des altérations superficielles ultérieures. Mais, indépendamment même de ces modifications postérieures, il suffit d'examiner la circulation actuelle des eaux dans un massif calcaire, avec tout le réseau de vides où elles s'infiltrent, pour comprendre ce qui a pu se présenter antérieurement dans un cas d'activité hydrothermale. Une restriction est cependant nécessaire avant de comparer le phénomène métallifère avec le phénomène actuellement visible dans l'épaisseur d'un plateau calcaire comme celui des Causses. Nous insisterons souvent sur cette idée que les métallisations filoniennes ne se sont pas, pour la plupart, prolongées au début jusqu'à la surface. Or, les circulations dont résultent nos grottes, avens, rivières souterraines, etc., sont des phénomènes à peu près localisés dans la zone de pénétration facile située au-dessus du niveau hydrostatique. Bien qu'il puisse en résulter des pénétrations de plusieurs centaines de mètres, on doit néanmoins se rappeler que la zone métallisée filonienne a dû rarement atteindre cette région des grottes proprement dites, qu'elle est d'ordinaire restée en-dessous. S'il y a eu remplissage direct d'excavations, celles-ci ont dû en général être creusées dans des conditions ascendantes filoniennes. Aussi croyons-nous qu'on a beaucoup trop généralisé les cas de dépôts métallifères dans des grottes attribuables à des phénomènes d'origine primaire : la plupart des gîtes interprétés ainsi n'étant que le résultat d'une remise en mouvement secondaire, souvent difficile à en distinguer.

Quoi qu'il en soit, les eaux métallisantes, qui, sur leur trajet souterrain, ont rencontré un massif ou un banc calcaire, n'en ont pas moins pris, dans celui-ci, une allure spéciale tenant à la multiplicité des diaclases et plans de joint qui découpent, dans la plupart des terrains semblables, un système parallépipédique et qui, dans des cas plus particuliers, y forment de véritables zones de broyage. C'est surtout à propos du plomb et du zinc, un peu aussi à propos du fer, du manganèse, du cuivre, que nous aurons à examiner cela. Nous distinguerons, dans les gisements plombo-zincifères en terrains calcaires : le type zone de broyage (avec substitution possible) donnant ce qu'on appelle parfois une Chamber Mine, à Euréka, Raibl, Sala (ou, pour le manganèse, à Las Cabesses) ; puis le type pénétration en escalier (rakes, flats et pipes) représenté dans la chaîne pennine anglaise, le Missouri, à Mapimi, etc. ; enfin le type contact de roches imperméables et filons-couches (Leadville, Bingham, Bulgar Maden, Laurion, Sardaigne, Vieille Montagne), auquel, en raison de

son importance, nous allons consacrer un paragraphe. Ces pénétrations, encore compliquées par les phénomènes ultérieurs dont nous venons de parler, aboutissent à des gisements, dans lesquels il serait difficile au premier abord de reconnaître un filon théorique. Sans empirer sur leur description future, nous allons en mentionner quelques cas.

Comme zone de broyage, le gîte d'Euréka, dont nous donnerons les coupes et plans¹, est très caractéristique. On y observe, entre deux failles qui se rencontrent vers le bas, une sorte de prisme calcaire, entièrement disloqué, dans lequel la métallisation a rencontré des fissures de toutes sortes et, sans doute, par endroits, des vides plus développés, formant chambres, que la circulation des eaux thermales a pu encore élargir. Quelquefois, comme à Sala, le dépôt d'incrustation paraît avoir été compliqué d'une pénétration par substitution dans les blocs de calcaire encaissants.

Les chambres qui se sont ainsi réalisées sont très différentes de celles qui se produisent le long de certains filons de mercure californiens, peut-être par un effet de torsion, et que Becker a appelées également chamber veins.

La chaîne pennine anglaise et le bassin du Mississipi offrent d'excellents exemples de gisements en escaliers, dans lesquels la minéralisation a affecté simultanément, soit des plans de joint horizontaux et des salles horizontales à divers étages (flats), soit des diaclases verticales (veins ou rake veins), soit des sortes de tuyaux (pipes, channels) produits à l'intersection de deux cassures horizontalement ou verticalement². Beaucoup de ces crevasses (gash veins) paraissent avoir été élargies par la circulation des eaux. Quelquefois il s'est creusé, à un moment quelconque, soit avant le dépôt primitif, soit de préférence après coup, des excavations ou grottes.

Les gisements de Mapimi au Mexique ont donné des exemples tout à fait grandioses de puits métallisés reliés par des galeries obliques et cela sur près de 700 m. de haut.

7° ROLE DES CONTACTS HÉTÉROGÈNES

L'existence de contacts hétérogènes entre terrains d'inégale perméabilité, comme un calcaire et un schiste, un calcaire et un porphyre, etc., a, dans d'innombrables gisements, déterminé une localisation des eaux métallisantes, dont sont résultées des sortes de filons-couches parfois très étendus. Le contact de calcaires et de schistes est presque le cas normal pour les gisements de zinc encaissés dans des calcaires, si bien qu'il en est résulté souvent l'idée fautive de strates calcaires métallisées pendant la sédimentation même. Parmi les exemples tout à fait typiques, qui seront longuement décrits plus tard, il suffira de citer les gîtes du Laurion grec, où une série de contacts successifs entre des calcaires et des schistes alternants ont été tous plus ou moins métallisés³. L'île de Thasos présente une

¹ Voir fig. 385 à 390.

² Voir fig. 391.

³ Voir fig. 440 à 448.

minéralisation analogue. Divers gisements zincifères de Sardaigne et de Belgique se trouvent également, comme le montreront nos coupes, le long d'un contact ou à son voisinage.

Les phénomènes de ce genre sont particulièrement frappants pour les minerais de zinc, par suite de la transformation si facile de la blende en calamine dans de semblables calcaires, qui a eu pour effet de donner à de tels gites une forme en amas très profitable; mais on les retrouve également pour d'autres métaux.

Pour le plomb, on a un exemple bien net dans les immenses gisements de Leadville au Colorado, situés dans un calcaire sous un porphyre¹ et dans ceux de Bulgar Maden en Turquie d'Asie, qui présentent exactement la même disposition. Le bassin du haut Mississipi offre encore, avec un type différent, un niveau calcaire métallisé dans toutes ses diaclases sous un toit de schistes.

Comme cas de contact entre des schistes et microgranulites, je citerai également les minerais de Pierrefitte dans les Pyrénées. Là, sur le passage d'une venue métallifère qui s'est disséminée de tous côtés dans les schistes, sous forme de veinules généralement inutilisables, se sont rencontrées accidentellement des microgranulites, le long desquelles s'est formé le gisement principal, sorte de couche métallisée de forte épaisseur, où les minerais sont disséminés par paquets dans le quartz.

Il est également permis de rattacher au même phénomène, avec un contact de quartzites, la localisation des filons du Sarrabus (fig. 475)¹.

C'est, peut-être, une simple influence de ce genre, qui se manifeste dans le cas souvent cité de certains gisements de Freiberg, où, d'après H. Müller, les filons sont riches dans le gneiss et s'appauvrissent dans le micaschiste, mais en subissant une concentration remarquable au-dessous du micaschiste, qui est très peu fissuré.

Quelquefois aussi le contact s'est fait entre deux calcaires différents, et nous serions très disposé par assimilation à faire rentrer dans ce groupe les gisements silésiens, malgré leur réputation de strates sédimentaires si bien établie.

De même pour le fer, à l'île d'Elbe, nous avons mis ailleurs en évidence, le développement fréquent des minerais de fer, où de telles substitutions se manifestent, le long des contacts entre calcaires et schistes. Les filons du Capo d'Arco en sont un exemple très net².

En Algérie, les gisements de la Tafna et un grand nombre d'autres que nous avons décrits autrefois (Rar El Maden, etc.) sont encore dans le même cas³.

Pour le cuivre, on peut citer Miedzianka en Pologne russe, où les minerais s'intercalent entre des calcaires et des quartzites, avec produits d'altération habituels.

Nous retrouverons encore des formations de ce genre même pour l'antimoine et l'étain.

¹ Voir fig. 395 à 403.

² Voir *Métallogénie de l'Italie*, p. 101 et divers autres exemples dans le même ouvrage, relatifs à la Toscane.

³ *Richesses minérales de l'Afrique*, p. 176, etc.

Il est, du reste, à remarquer qu'indépendamment même du contact, certains calcaires poreux ont dû évidemment offrir à la pénétration des liquides des conditions particulièrement favorables, qui ont amené ces liquides à s'y accumuler de préférence. C'est l'explication de la localisation si fréquente des asphaltes dans les calcaires barrémiens à facies urgonien de l'Est de la France.

C'est enfin pour une raison analogue que, dans un autre plan de projection, les contacts verticaux d'un terrain perméable avec une roche éruptive ou un filon préexistant, ont été souvent suivis par des eaux métallisantes : le cas que nous indiquons ici étant, bien entendu, tout à fait distinct de celui précédemment examiné, où le contact tient à une relation d'origine entre le minerai et la roche et l'intervention de ce contact ayant été ici purement mécanique. Les fentes de retrait, qui ont pu s'ouvrir le long d'une roche ignée par le refroidissement de celle-ci, ont dû souvent préparer un vide, où se sont ensuite localisées les eaux.

8° IMPRÉGNATIONS STRATIFORMES

Quand, au milieu d'un ensemble de terrains généralement imperméables aux eaux, celles-ci ont rencontré une strate poreuse et perméable, elles s'y sont naturellement concentrées et ont pu l'imprégner de minerai dans toute son étendue. Il en résulte l'apparence d'une couche de minerai stratifiée, comme dans le cas précédemment examiné des contacts hétérogènes. C'est un peu comme si les eaux qui alimentent aujourd'hui la nappe artésienne des sables verts au-dessous de Paris se trouvaient être métallisées par une cause quelconque et déterminaient une couche d'imprégnation.

Ce phénomène s'est quelquefois réalisé sur une couche verticale. Il en est résulté la disposition tout à fait particulière du gîte cinabrifère d'Almaden, où des grès ont été imprégnés par une dissolution de silice et de cinabre, dont on voit au microscope le dépôt s'insinuer entre les grains et les contourner (voir la figure 485). Il a fallu, pour qu'une solution pût ainsi pénétrer dans des interstices presque capillaires, qu'elle eût peu de disposition à se précipiter ; et c'est pourquoi le mercure à peu près seul nous présente un cas semblable.

Ailleurs, il semble bien que les eaux aient pénétré, soit par en bas, soit par en haut, dans certains grès et conglomérats encore meubles. On est tenté d'expliquer ainsi les grès à nodules plombifères comme ceux de Commern et Saint-Avoid dans la Prusse rhénane (fig. 383), et surtout beaucoup de conglomérats aurifères situés dans une zone ayant subi, d'autre part, des imprégnations diffuses : conglomérats, dont le Witwatersrand offre un exemple extraordinaire par ses dimensions et d'autant plus discutable (fig. 537 à 539).

9° VIDES CREUSÉS PAR LES EAUX MÊMES. — SUBSTITUTIONS

Malgré la diversité des cas examinés jusqu'ici, nous avons toujours supposé que le vide préexistait à son remplissage et qu'il en était, dans

une certaine mesure, indépendant. On est cependant en droit de supposer que les eaux thermales chargées de solutions métallifères, d'acide carbonique, etc., ont été loin de rester inertes et qu'elles ont pu exercer, sur les terrains encaissants, spécialement sur les calcaires, mais parfois aussi sur des roches feldspathiques, des actions de dissolution et de substitution. L'eau thermale aurait alors, non pas seulement suivi une crevasse de forme quelconque préexistante, mais l'aurait élargie, puis incrustée, ou se serait répandue autour d'elle à la façon d'une tache d'huile, en exerçant une action de substitution. Ce serait, en somme, quelque chose d'analogue au phénomène courant, qui, près de la surface, détermine la dissolution du calcaire et sa reprécipitation (parfois dans les mêmes vides) en stalactites. Dans ce cas plus encore peut-être que dans tout autre, on a parfois peine à distinguer les réactions originelles des réactions ultérieures dues aux altérations ; néanmoins un certain nombre de faits paraissent bien dus aux conditions de dépôt primitives.

Ainsi, si nous prenons un filon d'étain, nous constatons souvent que le dépôt de la cassitérite a été accompagné d'une dissolution du feldspath, auquel la cassitérite peut même se substituer. La roche qui encaisse les filons d'étain a subi des modifications, dans lesquelles certains de ses éléments ont disparu, tandis qu'il se formait des vides, dans lesquels ont cristallisé d'autres minéraux géodiques. Souvent elle a été chargée ainsi de tourmaline, de topaze ou de fluorine. On a quelquefois rattaché à ce genre d'action la kaolinisation, si fréquente au voisinage des filons d'étain et parfois aussi réalisée le long d'autres filons. Mais, comme nous le verrons plus loin et malgré certaines objections récentes, nous croyons beaucoup plutôt à l'origine superficielle de la kaolinisation.

Ailleurs la pénétration du minerai dans la roche encaissante s'est faite sous la forme de grains pyriteux disséminés et il est bien vraisemblable qu'il n'y a pas eu simple dépôt dans des vides préexistants, mais aussi substitution proprement dite. La présence de ces pyrites a dû ensuite, par réaction superficielle, déterminer toute une série de phénomènes d'altération, qui se traduisent parfois parce qu'on appelle une propylitisation, ailleurs par le développement d'alunite, etc.

Mais c'est surtout, nous l'avons dit, dans les calcaires que les réactions considérées ici acquièrent toute leur intensité. Dans nombre de cas où les minerais de plomb et de zinc remplissent des sortes de grottes, on peut, indépendamment des remises en mouvement sur lesquelles nous insistons longuement, imaginer une dissolution possible par les eaux thermales, suivie d'un changement dans les conditions extérieures ayant déterminé la précipitation des minerais.

Quand, sur 3 ou 4 km. de long comme à Héliopolis, une fente filonienne déverse actuellement, sous forme de sources chaudes, des torrents de calcaire, il ne peut manquer de se créer en profondeur des vides là où celles-ci puisent leur chaux. Donc des grottes peuvent être creusées par voie ascendante, par action des acides carbonique ou sulhydrique et il y a lieu d'y penser pour certains groupes métallifères.

On peut également se représenter la dissolution zincifère se substituant molécule par molécule au calcaire. Nous avons déjà signalé le cas de Sala en Suède comme ayant pu donner lieu à une substitution. D'autres

grottes incrustées de minerais à Raibl, dans les Alpes, dans la chaîne pennine, dans le Mississipi, ont également fait croire, quoique d'une façon discutable, à de semblables actions de dissolution et de substitution.

Ailleurs, dans le cas des minerais du Haut-Mississipi localisés dans les diaclases d'un calcaire au-dessus d'un banc imprégné d'huile minérale, on s'est demandé si les vides résultant de l'altération des hydrocarbures n'auraient pas contribué à ouvrir les crevasses ultérieurement métallisées.

A Mapimi, au Mexique, où le phénomène que nous avons déjà signalé, a pris des dimensions tout à fait grandioses, le réseau de puits et grottes, qui traverse le calcaire sur 700 m. de haut, semblerait, pour bien des raisons, avoir été creusé, non par les eaux descendantes normales, mais par des eaux thermales ascendantes chargées d'acide carbonique.

Action de contact des venues métallisantes. — Ces réactions de substitution nous ramènent progressivement au cas déjà examiné, des gisements de contact type Banat qui en sont l'exagération dans une circonstance particulière où la roche ignée très voisine exerçait une influence très directe et très active.

Dans le métamorphisme de contact, il est naturel d'attribuer un rôle important à l'eau chargée d'alcalis et de sels en dissolution. Même sans aucune intervention de roche ignée, des eaux chaudes sous pression avec fluorures, chlorures, borates, ou simplement sulfures dissous, n'ont pu manquer d'exercer parfois un métamorphisme direct sur les roches encaissantes, qui, à leur tour, par la nature de leurs éléments chimiques agissant comme réactifs, ont pu contribuer plus ou moins énergiquement à la précipitation.

Il ne faudrait pas croire, cependant, que ces réactions, très étudiées dans les derniers temps par les Américains sous le nom de « métasomatisme », constituent un fait général. Dans bien des gisements, les épontes du filon sont, au contraire, restées à peu près intactes¹, ainsi que leurs débris englobés dans la fracture et c'est, naturellement, surtout le cas dans les filons concrétionnés, où un premier enduit incrustant, déposé d'abord sur les parois, a dû ensuite leur servir de protecteur. On est conduit à penser que la substitution a dû spécialement s'effectuer, quand on avait affaire à des fumerolles très actives, soit par leur température, soit par leur minéralisation : fumerolles circulant, non pas dans quelques grandes cassures bien définies, mais dans un réseau de fissuration compliqué.

¹ Cette observation n'est qu'approximative. Il y a toujours, en effet, le long des filons, une certaine altération, préparée par les mouvements mécaniques qui ont produit la fracture, déterminée ensuite par le contact des solutions thermales métallisantes et surtout accentuée plus récemment par le circuit des eaux à origine superficielle (voir aux chapitres VIII et X).

Certaines « altérations de contact », comme le développement de séricite ou de kaolin, le départ de silice, sont apparemment dues à ces réactions récentes, etc. Mais il n'en est pas de même pour d'autres phénomènes reliés à la formation métallifère elle-même, tels que les apports de tourmaline ou de topaze le long des gîtes stannifères, les silicifications fréquentes et surtout les introductions de minerais, et l'on doit, en outre, admettre, comme nous le verrons, que le lessivage des parois par l'eau thermale filonienne a contribué, dès l'origine, à la formation des gangues, avec appauvrissement correspondant sur les parois.

CHAPITRE VII

GISEMENTS HYDROTHERMAUX. — LE REMPLISSAGE

1° LE DISSOLVANT. — 2° LES ÉLÉMENTS DISSOUS ET LEURS RELATIONS AVEC LES ROCHES IGNÉES. — 3° LES AGENTS DE TRANSPORT. — 4° LES ACTIONS PRÉCIPITANTES. — 5° REMISES EN MOUVEMENT IMMÉDIATES. — 6° ACTION SUR LA ROCHE ENCAISSANTE.

Preuves d'une intervention des eaux. — Après avoir examiné la disposition du vide rempli, nous arrivons maintenant à son mode de remplissage et au dépôt des minerais qui l'ont incrusté.

Dans ce dépôt, tout le monde est, depuis longtemps, d'accord pour faire intervenir des dissolutions aqueuses ou peut-être, exceptionnellement, des vapeurs métalliques. L'idée d'une formation purement ignée n'est admissible que pour les gisements tout différents, décrits plus haut sous le nom d'inclusions et ségrégations, ou, à la rigueur, pour les dépôts périphériques. Mais, dans les cas que nous étudions maintenant ici, la nature des minerais, leurs formes de cristallisation, leurs associations prouvent suffisamment le rôle des eaux.

Les arguments essentiels sont les suivants :

1° Jamais on ne trouve, dans les filons, aucune trace de fusion ;

2° L'allure *concrétionnée*, caractéristique de bien des filons, le dépôt par croûtes successives implantées sur deux parois parallèles et laissant vides des géodes centrales, résultent directement d'un dépôt par les eaux et sont incompatibles avec une action ignée ;

3° Les éléments des filons se présentent dans les mêmes conditions que lorsqu'ils ont été déposés par les eaux et très différemment de ce qu'ils sont dans un produit de fusion. Ainsi les silicates, si caractéristiques des roches, sont rares dans les filons et, sauf dans quelques cas où un peu de feldspath a cristallisé dans des conditions peut-être analogues à celles de certaines pegmatites, n'y sont guère représentés que par des minéraux où l'action secondaire est visible, comme de l'épidote ou des zéolithes. Par contre, on retrouve la silice isolée à l'état de quartz, la chaux et la magnésic en carbonates, le fer en oxydes, comme dans les produits d'altération des silicates étudiés par Ebelmen ;

4° La calcite, la barytine, la fluorine, compagnons habituels des minerais dans les filons, ou *gangues*, cristallisent aisément par l'eau et ne semblent pas pouvoir être reproduites par fusion ;

5° On trouve, associés dans les filons, des minerais de fusibilité très

différente comme la chalcosine et la pyrite, le cuivre natif avec la calcite, la stibine avec le quartz, etc. ;

6° Le quartz filonien présente souvent des inclusions liquides. Des inclusions analogues se retrouvent dans divers autres minerais et gangues (blende, argent rouge) ;

7° On peut trouver en dissolution dans les eaux la plupart des éléments métallifères¹. On assiste à la production des minerais filoniens par de telles eaux quand on leur fournit les métaux nécessaires, comme dans les sources antiques étudiées par Daubrée ;

8° Les gisements de contact hétérogène, que nous avons déjà décrits plus haut, sont également un bon argument en faveur d'une venue aqueuse et probablement d'une venue profonde : une telle infiltration dans un plan de joint jusqu'à de grandes distances du point de départ n'étant pas compatible avec une intrusion ignée.

Discussion des théories per ascensum et descensum. — Si le dépôt par voie aqueuse n'est pas contesté, depuis l'origine de la métallogénie on discute pour savoir si ces eaux ont agi par en haut ou par en bas : *per descensum*, ou *per ascensum*. La première théorie, soutenue par Werner, fut longtemps celle de Freiberg. La seconde est presque universellement admise aujourd'hui.

Bien que, de temps à autre, la théorie *per descensum* ressuscite avec des variantes, les arguments en faveur d'une venue par en bas sont nombreux. Les principaux, que je me contente de rappeler, sont : 1° la continuité si souvent constatée jusqu'à un millier de mètres de profondeur, alors qu'une fissure remplie par en haut aurait dû rapidement s'obstruer au sommet et rester vide au-dessous ; 2° la forme sulfurée que l'on trouve communément dans la plupart des filons en profondeur, au-dessous d'une croûte oxydée toute superficielle, formation sulfurée qui implique un milieu profond réducteur ; 3° la relation avec les roches éruptives ; 4° souvent aussi la nature des minerais difficiles à reproduire autrement que par des eaux chaudes et sous pression ; 5° enfin tout l'ensemble de faits coordonnés qui seront exposés dans cet ouvrage.

L'impression très nette qui résulte de l'examen de gisements de plus en plus nombreux et qui, pour moi, s'accroît avec l'expérience, est que les théories diverses, parfois séduisantes, auxquelles on a pu penser dans tel ou tel cas particulier, doivent céder le pas devant une théorie plus générale, où le lien des métaux avec les roches éruptives et leur apport direct par les fumerolles condensées en eaux métallisantes apparaît comme extrêmement vraisemblable. Il faut cependant retenir la formation par en haut pour divers gisements d'altération secondaire, de remise en mouvement, de concentration superficielle, peut-être aussi songer à des métaux venant d'un recouvrement (tel qu'une nappe de charriage), aujourd'hui disparu. Mais, dans la presque totalité des gisements d'origine primaire, nous admettons une circulation hydrothermale ascendante, parcourant des vides de forme quelconque. Nous allons donc étudier successivement ce dissolvant, ses agents de minéralisation et ses agents précipitants.

¹ L. DE LAUNAY. *Sources thermo-minérales*, p. 83 et suiv.

1^o LE DISSOLVANT. — LES EAUX FILONIENNES ET LEUR ORIGINE. — ANALOGIES ET DIFFÉRENCES AVEC LES EAUX THERMALES ACTUELLES

Nous sommes arrivés à l'idée que, dans des vides de formes diverses, étaient montées des eaux apportant des minerais en dissolution. L'ouverture du vide et son incrustation sont, en principe, distinctes l'une de l'autre et l'on pourrait imaginer un long intervalle entre elles. Mais nous avons déjà fait remarquer que le remplissage paraissait avoir suivi de près la production de la fracture. Bien qu'il subsiste parfois, dans la profondeur de certains filons, notamment à Freiberg en Saxe, à Mies en Bohême, etc., des druses assez grandes pour livrer passage à un homme, bien que la circulation des eaux thermales prouve également une certaine persistance de vides profonds, nous avons déjà dit, précisément par comparaison avec les sources thermales actuelles, que l'existence d'une fracture librement ouverte paraissait avoir pu difficilement se prolonger au delà d'une période géologique déterminée. Cependant le remplissage, nous l'avons vu également, a dû se poursuivre pendant un temps suffisant pour qu'il se réalise les réouvertures, les brèches, les glissements dont il a déjà été question : la métallisation se divisant tout au moins en un certain nombre d'épisodes successifs. En outre, une région, une première fois disloquée, a pu se fracturer de nouveau par des réouvertures donnant lieu à des dépôts filoniens différents du premier cas.

Origine de l'eau filonienne. — Qu'est-ce que l'eau filonienne ? L'idée toute simple, qui vient d'abord, est de chercher une comparaison dans les sources thermales actuelles, où, par des recherches patientes, on a pu, en effet, retrouver la liste presque complète des métaux présents dans les gisements filoniens¹. Nous avons mis en garde contre une assimilation qui, tout en étant probablement exacte, est loin d'être absolue. Les traces de métaux apportées par les eaux thermales actuelles sont, en réalité, presque toujours insignifiantes, ou explicables par les conditions de circulation de ces eaux le long d'un filon préexistant.

Il faut, en tout cas, établir une grande coupure entre les eaux thermales de circuits simplement artésiens, qui sont, à notre avis, les plus nombreuses, dans toutes les régions où ne se manifeste aucune espèce d'activité éruptive et les eaux thermales en rapport probable avec un phénomène éruptif. Ces dernières seules pourraient actuellement déterminer, dans la profondeur, la cristallisation de minerais filoniens. A l'exception du mercure, de l'antimoine ou de l'arsenic, parfois signalés dans leurs dépôts, et de quelques autres traces métalliques reconnues aux Steamboat Springs de Californie, elles ne les apportent pas au jour, comme nous l'avons déjà remarqué, parce que leur composition au griffon superficiel est, dans toute hypothèse, un résidu de la minéralisation primitive, débarrassé en profondeur de tous les produits difficilement solubles et retenant seulement ceux dont la solubilité était suffisante.

Ainsi aucune trace de métal n'a été reconnue dans les geysers du Yel-

¹ Voir une liste dans les *Eaux Souterraines* de Daubrèe et dans mes *Sources thermominérales*. — Cf. A. GAUTIER (C. R., mars 1909).

lowstone ni dans ceux du Mexique. Le cas des geysers du Yellowstone, qui offre une manifestation particulièrement grandiose d'un semblable phénomène et l'une de celles où l'on croit retrouver le mieux l'image des phénomènes filoniens géologiques, est très instructif pour cette question des apports hydro-thermaux. Là, ce que les eaux auraient pu prendre dans une profondeur ignée et retenir en venant au jour se réduit à presque rien. Les eaux qui donnent des travertins calcaires les ont certainement empruntés aux calcaires tertiaires traversés. Celles qui apportent de la silice ont eu aussi toutes facilités pour la dissoudre sur leur chemin. Et nous venons de dire que les métaux manquent ¹.

De même dans le geyser d'Ixtlan, au Mexique ², les seuls éléments peut-être profonds sont assimilables à des fumerolles. On estime qu'il doit y avoir en profondeur des crevasses amenant des gaz très chauds d'acides chlorhydrique, sulfureux, phosphorique et borique. La teneur en acide borique est de 0,08, en acide phosphorique de 0,002, en silice de 0,2.

Cependant, aux Steamboat Springs, un échantillon de 3,5 kg. de dépôt siliceux renfermait 78 gr. de métastibnite (Sb^2S^3), 7 gr. de sulfure de plomb, 4 cgr. de sulfure de cuivre et 7 mgr. de sulfure de mercure. Les eaux de Sulphur Bank contiennent également un peu de cuivre. Celles de Boulder en Montana renfermeraient même, d'après W.-H. Weed, des traces d'or et d'argent.

D'où viennent ces eaux thermales des régions volcaniques ?

Comparables à celles qui se dégagent dans l'éruption même, elles peuvent être, en partie, des eaux de refusion des magmas internes, des eaux arrivant pour la première fois au jour, des eaux magmatiques, jeunes ou nouvelles. Elles seraient ainsi en rapport avec le dégagement de fumerolles, auquel nous allons attribuer un rôle prépondérant dans la métallisation ³.

Cependant, même quand il s'agit des geysers, on observe, dans le cas signalé plus haut d'Ixtlan au Mexique, que la quantité d'eau augmente notablement avec la saison pluvieuse. Une portion de l'eau y vient donc de la superficie et le rôle des eaux magmatiques est restreint ; si elles existent, elles doivent, en montant, se mélanger aux eaux météoriques et les refouler en les échauffant et les minéralisant, en les rendant par suite analogues à elles-mêmes.

Mode de circulation des eaux. — Si nous envisageons la circulation des

¹ VAN HISE, *loc. cit.*, 1032.

² 1906. WATZ. *Livret-guide du Congrès de Mexico*. — cf. 1832. LECONTE et RISING. *The phenomena of metal. Vein form. in progress at Sulphur Bank* (Am. J. of Sc., t. 24, p. 23). — 1960. WEED. *Mineral vein formation at Boulder Hot Springs, Montana*.

³ La question de l'eau magmatique a été récemment exposée d'une façon tout à fait contradictoire dans deux théories de MM. Armand Gautier et Brun. Pour le premier, il y a de l'eau dans toutes les roches de profondeur et cette eau se dégage dans le volcanisme. Arrhénius et Vogt admettent également l'intervention de l'eau dans la fusion des silicates ; et les expériences de Fouqué et Michel Lévy ont semblé montrer qu'une fusion aqueuse était nécessaire au moins pour les roches acides (les roches basiques seules ayant été reproduites par fusion sèche). Pour M. Brun, au contraire, dont nous avons déjà eu l'occasion de signaler la thèse, page 60, le volcanisme même ne dégagerait pas d'eau, et l'apparence en serait produite par de simples réactions superficielles, indépendantes du phénomène profond.

eaux filoniennes indépendamment des produits qu'elles renferment, nous pouvons revenir à la comparaison précédente avec les eaux souterraines actuelles, tout en retenant les différences qui existent entre les deux cas.

Le réseau hydrothermal qui nous est abordable est nécessairement un réseau presque superficiel et il nous manque, par conséquent, les conditions plus profondes du phénomène : celles qui, notamment par une accentuation de la pression, peuvent présenter un passage aux phénomènes ignés et une transition des gîtes hydrothermaux filoniens aux gîtes de départ immédiat et de ségrégation. Les lois des incrustations filoniennes ne peuvent, au contraire, être que les lois des *circulations aquifères profondes*. L'intensité doit surtout être extrêmement différente.

Concevons, en effet, l'image que pouvait présenter, au moment de sa cristallisation, un champ de filons comme ceux de l'Ouest américain, ou simplement comme ceux de Freiberg, en supposant que les fractures métallisées de la profondeur, aujourd'hui siège de nos mines, se soient continuées jusqu'au jour et que les eaux métallisantes, après avoir déposé plus bas leurs minerais, s'y soient épanchées. Ce sont des fractures béantes, longues de plusieurs kilomètres, ouvertes souvent sur 10 ou 15 m. de large et plus encore ; et, dans une région fracturée, ce sont quelquefois, des centaines et des milliers de fractures (on en a compté 1 800 à Freiberg, 5 000 à Gilpin, des centaines à Cobalt, etc.). Il est évident qu'aujourd'hui nous n'avons rien de semblable dans la presque totalité de nos sources thermales, même dans celles en rapport avec des manifestations volcaniques, où l'on observe souvent uniquement un point d'émergence, un griffon localisé, et, tout au plus, une série de semblables griffons groupés dans une région déterminée comme à Karlsbad, à Teplitz, à Vichy. Seuls, des cas comme ceux du Yellowstone, des Steamboat Springs, du Sulphur Bank, des geysers d'Islande ou de Nouvelle-Zélande, des fractures thermales de plusieurs kilomètres comme celle d'Héliopolis ou d'Hammam Meskoutine, semblent nous offrir une image atténuée de ce qui a pu se passer anciennement. Il y a eu évidemment, dans l'histoire de la Terre, des périodes de paroxysme hydrothermal et volcanique, dont nous n'avons plus aucune idée, absolument comme, pour les précipitations pluvieuses, le pliocène. Et les deux phénomènes, que je ne réunis pas par hasard, peuvent avoir un lien. Une intense activité volcanique a pu, en répandant des torrents d'acide carbonique dans l'air, modifier le régime des pluies. Cependant, il est vraisemblable que le phénomène filonien n'est pas entièrement terminé ou interrompu aujourd'hui et, par suite, il doit se dégager quelque part des eaux magmatiques ayant métallisé leur circuit profond. Ces eaux, nous sommes portés à les chercher dans les régions volcaniques, bien que, pour la raison expliquée plus haut, elles nous y parviennent au jour stérilisées. Après avoir suivi leur réseau souterrain, en déposant successivement, à mesure que les conditions se modifiaient, leurs divers produits en dissolution, elles doivent, finalement, arriver à la surface appauvries, retenant seulement des corps banals comme les alcalis, la chaux, etc.

Il est d'observation courante que les travaux de mines rencontrent souvent des sources thermales sur des filons ou qu'inversement en étudiant le griffon d'une source thermale actuelle, on le voit situé sur un filon

métallifère¹. Dans la plupart des cas, ce sont là, pour nous, des effets de réouverture, plutôt que des preuves d'un phénomène d'incrustation ancien continué sous nos yeux. Citons seulement les exemples de la Sierra Almagrera, de Boccheggiano, de Freiberg, du Comstock, de Sulphur Bank, etc. Dans les régions à volcanisme récent, à faible degré géothermique, ces sources thermales sur les filons se multiplient et on est amené progressivement à des cas où le dégagement métallifère semble bien se continuer sous nos yeux (geysers mercuriels de Californie, Nouvelle-Zélande, etc.).

Nous avons plus haut cité des cas, comme Héliopolis ou Karlsbad, qui, en plan horizontal, offrent des éléments de comparaison avec les filons métallifères anciens. Leur étude montre aisément que, sur la longueur d'une fissure thermique, les eaux sont loin de se dégager également, mais qu'elles se concentrent, au contraire, sur certains points où la venue d'eau est plus intense. Il y a griffons restreints, dont la localisation s'accroît par le comblement progressif de la fissure. C'est une explication de l'inégale répartition que l'on observe toujours pour les minerais dans la longueur d'un filon et qui y détermine des cheminées d'enrichissement, lentilles, etc.

Si nous envisageons maintenant une coupe verticale, nous imaginerons une cheminée d'ascension principale suivant une fissure qui s'anastomose progressivement comme un réseau veineux et nous nous représenterons le départ des minerais en relation directe avec le déplacement des magmas ignés. On doit supposer que, plus la pression était forte, plus la liqueur minéralisante devait pénétrer loin latéralement dans des interstices capillaires, donnant des gîtes à allure interstratifiée, que nous avons appris à connaître comme filons-couches ou imprégnations de profondeur.

2° ORIGINE DES ÉLÉMENTS PRÉCIPITÉS. — MINÉRAIS ET GANGUES. — LEURS RELATIONS AVEC LES ROCHES IGNÉES. — THÉORIE DE LA SÉCRÉTION LATÉRALE.

Le remplissage d'un filon, tel que nous l'observons, se compose d'un certain nombre de minéraux associés, qui tantôt semblent s'être déposés simultanément et tantôt manifestent des étapes de dépôt successives. Suivant leur valeur pratique, on sait que l'on divise ces minéraux en *minerais* et *gangues*: le mot de gangues étant réservé aux produits pierreux et réputés stériles qui accompagnent les minerais et qui doivent en être séparés pour obtenir un produit marchand.

Relation d'origine avec les roches ignées. — Nous allons d'abord nous attacher à montrer, comme nous l'avons déjà annoncé plus d'une fois, que les métaux filoniens, comme ceux des inclusions ou ségrégations, dérivent des roches ignées, sauf à examiner ultérieurement le problème plus discutable de savoir comment elles en sont sorties.

Cette relation d'origine apparaît d'abord par la seule localisation des champs métallifères dans les zones tectoniques qui portent la trace

¹ Voir L. DE LAUNAY, *Sources thermo-minérales (passim) et Métallogénie de l'Italie*.

d'actions ignées. C'est la vraie raison pour laquelle l'opinion vulgaire place d'ordinaire les filons métallifères dans les régions accidentées et montagneuses du globe. Ce sont celles qui ont subi les plissements et les dislocations, dont sont résultées les intrusions ignées. Il est manifeste que les grands districts métallifères de l'Ouest américain, du Mexique, de la Bolivie et du Chili, du Japon, etc., se trouvent dans des régions fortement affectées par des actions ignées dont ils dérivent. Si la corrélation est moins évidente quand il s'agit de gisements métallifères plus anciens, elle n'en apparaît pas moins quand on regarde les choses d'un peu près. Ce n'est pas à dire que, partout où il apparaît un filon de fer, de plomb, de zinc, ou surtout de mercure, on ait une roche éruptive au voisinage. Nous insisterons bientôt sur le départ assez lointain que paraissent souvent avoir subi les sulfures de ces métaux dans les eaux thermales filoniennes. Mais, même dans ce cas, on peut, en général, remonter à la source première d'où ces métaux sont émanés.

Cette relation d'origine peut-elle être précisée par des analyses? On l'a souvent essayé, et c'est une question dont nous avons déjà dit un mot à propos des inclusions. Bischof, Sandberger, Stelzner, Spurr, Vogt, Emmons, Foster Bain¹ et bien d'autres se sont attachés à analyser les roches et terrains voisins d'un gisement métallifère pour y chercher des métaux et quelquefois ils en ont trouvé. Il faut bien dire que ces travaux soulèvent diverses objections. D'abord en ce qui concerne les analyses mêmes, il est arrivé que Stelzner n'a retrouvé aucun des résultats annoncés précédemment par Sandberger. En Australie, toutes les analyses de Don sur des roches voisines de filons aurifères, aussi bien des roches intactes que des roches altérées, ont donné des résultats négatifs. Puis, lorsqu'on observe quelques métaux au voisinage d'un grand gîte métallifère, on peut toujours se demander s'ils ne viennent pas du phénomène qui a produit celui-ci, au lieu d'y avoir contribué. Enfin on remarquera que, si une roche est supposée avoir fourni des métaux à un gîte voisin, elle ne doit logiquement plus les contenir; elle doit donc, ce qui semble tout d'abord paradoxal, en renfermer moins qu'une autre. Mais, comme, d'autre part, on peut supposer qu'une roche métallisante devait être originellement d'une richesse métallique spéciale, on n'a plus aucun élément de comparaison. L'analyse ne renseignerait que si l'on démontrait l'emprunt des métaux à certaines parties bien déterminées de la roche, devenues, le long de certaines fissures, plus pauvres en ces métaux que les parties voisines. Or on ne l'a jamais fait. Cet ordre d'investigations ne paraît donc, pour le moment, pouvoir prouver qu'une chose, c'est la dispersion assez habituelle des métaux dans les roches. Ainsi la plupart des roches dans la région du Lac Supérieur sont un peu cuprifères, d'après Van Hise, ce qui concorde avec la formation de grands gisements de cuivre au voisinage².

¹ 1906. FOSTER BAIN. *Some relations of paleogeography to ore depos. in the Mississippi valley* (Cong. Mexico, 483).

² KEMP a considéré comme une objection capitale à la théorie de la sécrétion latérale qu'il faut supposer tour à tour les mêmes eaux, presque dans les mêmes conditions, ayant circulé des parois vers la cavité, dissolvant dans le premier cas les métaux et les redé-

Quand on compare aux roches les sédiments, on y trouve d'ordinaire les métaux en proportions beaucoup moindres. En effet, les roches et les gites métallifères inclus, quand ils ont été attaqués par les érosions, ont bien mis en mouvement des métaux ; mais une faible partie de ceux-ci seulement a dû pouvoir se concentrer par des réactions précipitantes locales dans les sédiments ; le reste a dû aller peu à peu s'engloutir dans la mer.

Bien plus que des analyses, la relation des métaux filoniens avec les roches ignées résulte du lien géologique et tectonique qui apparaît presque constamment entre ces deux groupes de productions, surtout pour toute la catégorie des métaux dont le départ a été peu accentué, l'étain, le tungstène, le bismuth, le molybdène, le cuivre, l'or, etc.

Dans le détail, cette relation se précise et nous nous attacherons à la signaler au cours de tout cet ouvrage. On verra alors que chaque métal se rattache, non seulement à une zone ignée quelconque, mais, suivant sa nature propre, à une roche ignée déterminée. Nous constaterons ainsi, dans l'ensemble, une richesse toute spéciale en métaux autour des roches acides à bases alcalines, écume légère et superficielle du bain de fusion profond, sans doute plus riche en chlorure de sodium, qui aura contribué à rendre le bain fluide et à faciliter le départ de certains métaux en chlorures volatils.

Si nous nous bornons à ce groupe acide, autour de ses types à structure granitique, que nous regardons comme des roches de cristallisation profonde, nous trouverons l'étain et les métaux de la même famille, tungstène, bismuth, etc., souvent aussi l'or¹. Quand ces roches passent à des structures microgranitiques, nous commençons à voir se développer la stibine, ou, dans d'autres conditions, le cuivre, parfois le cobalt. Plus loin de la roche mère ou plus près de la surface, avec des roches filoniennes franchement microgranitiques ou ophitiques, nous avons le groupe du plomb et du zinc. Ceux-ci se poursuivent avec des roches microlithiques d'intrusion superficielle ou d'épanchement en s'accompagnant alors volontiers d'argent ; et, finalement, nous voyons apparaître le mercure avec les produits volcaniques proprement dits et les sources thermales actuelles. En plan, cela se traduit quelquefois par des auréoles de métallisation successives dont nous avons déjà dit un mot.

Pour nous borner aux métaux les plus directement associés à la roche alcaline, on peut les diviser en trois groupes : ceux qui se combinent directement avec le silicium ou le phosphore dans la roche même (Al, Gl, Zr, Co, Ur, Rad) ; ceux qui restent oxydés (Sn, W) ; ceux qui s'écartent en sulfures (Mo, Co, Bis, Cu, Sb). Chaque type de roche donne lieu à une exagération quartzreuse, où se concentrent les minéraux et, spécialement, les minerais.

En ce qui concerne particulièrement le cuivre, nous aurons longuement à insister sur un groupe important de filons situés presque directement au contact de roches ignées, dont il est difficile de nier qu'ils dérivent.

posant ensuite. Cette objection, si elle était la seule, ne serait peut-être pas très difficile à lever puisque c'est exactement ce qui se passe pour les stalactites et ce qui a dû se passer pour tous les minerais de remise en mouvement.

¹ Voir le schéma fig. 2 p. 53.

Mode de départ. — Théorie de la sécrétion latérale — Si la relation d'origine précédente est assez généralement admise, le mode et l'époque du départ sont, au contraire, parmi les points les plus discutés de la métallogénie.

Les théories nombreuses émises à ce sujet peuvent se ramener à deux principales : apport direct de la profondeur par les roches ignées en fusion ; emprunt postérieur aux roches refroidies ou aux terrains encaissants. L'une et l'autre hypothèses peuvent se concilier avec le fait, à notre avis incontestable, que les gîtes métallifères se rattachent aux roches ignées. Mais, dans la première hypothèse, on admet que ces roches, ayant puisé leurs métaux à une réserve profonde, les ont immédiatement dégagés pendant qu'elles étaient chaudes encore, pour minéraliser plus ou moins directement les filons ; dans l'autre, on suppose que les traces de métaux sont restées dans la roche pendant son refroidissement et qu'elles en ont été extraites longtemps après, par un lessivage dû, soit à des eaux superficielles, soit à des eaux thermales, et constituant ce qu'on a appelé la *sécrétion latérale*. Entre les deux hypothèses, ce n'est pas par l'analyse des roches encaissantes que l'on peut trancher, à moins d'étendre son champ d'expérimentation très loin et de multiplier singulièrement les essais. Les traces de métaux, — contestables comme nous l'avons vu¹ — que peuvent retenir ces roches, s'expliquent également dans les deux hypothèses, comme un résidu du départ ancien ou récent ; et, dans les deux hypothèses également, mais surtout dans la seconde, les tentatives faites pour préciser se heurtent à la même objection : la roche devant logiquement être d'autant plus pauvre en métaux qu'elle en a plus fourni.

Dans le cas général des métaux proprement dits, nous avons déjà expliqué pourquoi un emprunt direct à la roche ignée, et peut-être même au bain profond d'où elle provient, nous paraît expliquer mieux les faits d'observation : notamment la grande localisation de certains métaux dans des régions, où aucune roche actuellement existante ne contient le même métal en quantités exceptionnelles. Nous croyons qu'un simple phénomène de circulation aqueuse chaude ou froide, exercé sur une roche depuis longtemps solidifiée, aurait eu nécessairement une action très restreinte, très locale, dont on ne voit pas les indices, tandis que le départ effectué en pleine fusion a pu avoir une influence sur tout l'ensemble et extraire à la fois un métal disséminé dans toutes ses parties.

Mais, si cette théorie nous semble la vraie dans l'ensemble, il n'en résulte pas qu'elle s'applique à tous les cas particuliers, et, pour les filons les plus nombreux, on doit au moins discuter, comme nous allons le faire bientôt, avant de l'étendre aux éléments banals, comme la silice, la calcite, la barytine, les gangues en un mot, dont la présence dans un gisement n'implique aucun apport spécial et peut s'expliquer par un emprunt à une roche ou à un terrain quelconques.

Pour les minerais eux-mêmes, nous verrons, par exemple, que dans les fissures superficielles de certaines roches, il a pu s'isoler de la limonite, ailleurs du manganèse. Ce sont des cas très vraisemblables de sécrétion latérale entendue dans le sens d'une action toute de surface ; et

¹ Page 75 et page 131.

la même conclusion peut s'appliquer à tant de veines sans continuité profonde renfermant de la barytine, de la fluorine, etc.

Ailleurs, par exemple pour les minerais du Haut-Mississipi, nous verrons qu'on a soutenu l'idée d'une sécrétion latérale assez particulière. Il y aurait eu dissémination première de traces plombo-zincifères dans toute l'étendue d'une strate calcaire. Après quoi, des eaux artésiennes ascendantes, emprisonnées sous pression, auraient dissous ces métaux en circulant dans les fissures du calcaire et les auraient bientôt reprécipités en se rapprochant du jour. Des théories analogues ont été souvent proposées pour expliquer les formes de métallisation très particulières observées dans certains massifs de « calcaires métallifères », où, localement, on trouve des minerais sulfurés de plomb, zinc, etc., toujours localisés dans les mêmes bancs.

C'est encore une sorte de sécrétion latérale, mais appliquée, dans des conditions beaucoup plus vraisemblables, à un gîte préexistant, que nous serons amenés à invoquer pour expliquer, par des remises en mouvement, la concentration de certains métaux, cuivre, argent, or, etc., dans une zone dite de cémentation.

Origine des gangues. — Malgré des restrictions précédentes, quand il s'agit, par exemple, du mercure, on ne peut guère s'imaginer le gisement d'Almaden formé après coup par l'action d'eaux superficielles, ou même d'eaux thermales artésiennes et stériles par elles-mêmes, se contentant de laver des roches et terrains, dans lesquels nous ne constatons nulle part une teneur en mercure exceptionnelle. Mais le problème se pose tout différemment quand on considère les gangues; et ceux mêmes qui croient le plus fermement à un apport interne de l'étain ou de l'or pourraient être tentés d'admettre, en même temps, un emprunt superficiel quand il s'agit du quartz, de la calcite, de la dolomie, de la barytine, de la fluorine, etc. Il y a là un problème qui vaut la peine d'être examiné et discuté.

A cet égard, voici comment se pose la question. On ne saurait d'abord discuter la possibilité que des eaux souterraines actuelles dissolvent et redéposent ces éléments banals, puisqu'on le leur voit faire tous les jours. On doit donc admettre que le même fait a pu et dû se produire dans les anciens filons et le seul point contestable est de savoir si cette remise en mouvement a pu atteindre les proportions d'un véritable remplissage filonien prolongé sur un kilomètre de haut, ou si elle s'est bornée à des déplacements restreints.

Quelques observations semblent d'abord en faveur d'une large remise en mouvement superficielle. Tout d'abord, on voit nettement certaines gangues, dont la principale est la barytine, disparaître vite en profondeur, après avoir été abondantes à l'affleurement des filons qui, on le remarquera, représente, par suite de l'érosion, un point presque quelconque dans la hauteur du remplissage ancien. Nous discuterons particulièrement ce point au chapitre du baryum et nous verrons alors que, si une origine superficielle paraît vraisemblable pour un grand nombre de concentrations barytiques, néanmoins dans des filons comme ceux du Barytische Blei de Freiberg, où le remplissage barylique persiste encore à 3 et

400 m. de profondeur, on est amené à admettre, suivant la théorie la plus répandue, un apport interne du baryum analogue à celui du plomb.

Un autre ordre de faits, signalé dans divers districts métallifères, paraîtrait montrer un changement dans la nature de la gangue quand se modifie la roche encaissante : quartz dans les roches plus siliceuses ; calcite dans les roches plus riches en chaux. On pourrait en conclure qu'il y a un emprunt direct et superficiel à cette roche encaissante. Mais les coïncidences de ce genre sont peu nombreuses et contredites par des observations d'égale valeur. Il est donc assez difficile d'en tirer parti.

Enfin une observation plus théorique consiste à remarquer le caractère oxydé habituel chez les gangues, tandis que les métaux connexes sont à l'état de sulfures. Pourquoi s'est-il déposé, simultanément avec du sulfure de plomb, du sulfate de baryte ou du carbonate de chaux, si leur dissolution, ayant la même origine, avait d'abord la même forme de chlorures ou de sulfures. Les modes ordinaires de précipitation de ces corps par le carbonate d'ammoniaque, par l'acide sulfurique ou un sulfate, sont difficiles à imaginer en profondeur sans un emprunt d'oxygène à la dissociation de l'eau ou au milieu superficiel. On est conduit à supposer : pour la chaux, un bicarbonate modifié par un changement de température ou de pression ; pour la baryte, une dissolution instable de sulfate. La présence d'un bicarbonate se comprend aisément dans des eaux qui devaient être très chargées d'acide carbonique comme toutes celles des massifs volcaniques ; celle d'un sulfate de baryte préexistant offre un caractère plus superficiel, qui tendrait à expliquer pourquoi, en toute hypothèse, le nombre des filons barytiques disparaissant en profondeur est considérable¹.

Par contre, nous observerons, d'une façon très habituelle, une relation entre la nature du métal et celle de la gangue : relation particulièrement accusée pour quelques métaux, comme l'étain, l'antimoine, l'or, etc., à peu près exclusivement associés à des filons quartzeux, tandis que l'argent se rencontre fréquemment avec de la calcite. Cela tient évidemment d'abord aux conditions du dépôt : ces métaux, associés au quartz, s'étant précipités dans des conditions où les carbonates, s'ils existaient, ont dû rester en dissolution. Cependant, on peut se demander si les éléments que l'on a l'habitude de trouver associés n'ont pas la même origine interne. Tout au moins ont-ils dû se réunir dans une partie bien profonde de leur circuit.

Le problème ne pouvant être tranché d'une manière absolue, nous allons examiner tour à tour les principales gangues filoniennes. La plus abondante est la *silice* qui est le compagnon normal de tous les remplissages profonds. Dans ce cas, la question d'origine ne se pose pour ainsi dire pas. Sans doute, quand nous parlerons des remises en mouvement, nous verrons que la silice n'est nullement insoluble dans l'eau superficielle et qu'elle se déplace, au contraire, souvent, pour recristalliser. Certaines veines siliceuses de surface sont assurément dues

¹ Parmi les composés du baryum qui auraient pu contribuer à un départ profond, le sulfure ne s'obtient pratiquement qu'en partant du sulfate ou du carbonate et l'eau le décompose en hydrate d'oxyde. La vapeur d'eau, agissant sur ce sulfure amorphe, donne du sulfate. Le fluorure est très peu soluble dans l'eau. Seul le chlorure de baryum-hydraté semble une forme admissible, puisqu'il existe dans certaines eaux.

à une semblable réaction, sans parler des dépôts actuels de geysérite. On peut même se demander, quand on constate des filons de quartz au milieu du kaolin, si ce quartz n'est pas un résidu de l'altération kaolinieuse. Mais, partout ailleurs, on voit les filons de quartz former le terme extrême de roches ignées, qui peuvent présenter des structures diverses et auxquelles ils passent souvent latéralement. Beaucoup d'entre eux, notamment, sont l'aboutissement de magmas granitiques, par l'intermédiaire de granites à mica blanc et de pegmatites. Il n'y a aucune raison pour attribuer à la silice, dans ces filons, une autre origine que dans la roche éruptive elle-même. Les filons stannifères, en particulier, paraissent bien rentrer dans ce cas et il semble que la cassitérite vienne s'y associer au quartz et au mica blanc, comme peut le faire ailleurs le feldspath, auquel elle se substitue. On arrive donc, dans ce cas particulier de la silice, à concevoir que toutes les réactions, par lesquelles la silice entre en dissolution, sont à retenir comme explication possible de sa présence à l'état cristallisé dans les filons et on sait qu'il en est de très nombreuses, depuis la seule réaction de l'eau chaude sous pression sur un silicate jusqu'à l'influence superficielle plus lente de l'eau chargée d'acide carbonique.

C'est, assurément, la raison pour laquelle la silice est, dans ces filons hydrothermaux, l'élément le plus répandu et le plus banal.

La nature du quartz présente, avec celle des métaux englobés, une relation qui serait intéressante à examiner en détail. Ainsi à Freiberg, les filons de quartz argentifère, dits *Edle Quartz*, qu'on a suivis jusqu'à 500 m. de profondeur, montrent, à l'examen microscopique, un poudrage extrêmement fin d'argyrose dans un quartz qui est lui-même à très petits éléments comme un quartz secondaire. Par contre, des quartz stannifères sont à grandes plages, comme les quartz de pegmatite.

Dans les différences que présentent, entre eux, les quartz associés aux divers métaux et compris dans des types de gisements différents, interviennent sans doute la teneur en silice des eaux précipitantes et la rapidité de précipitation. On conçoit, par exemple, que l'eau magmatique dégagée à haute température puisse contenir une quantité anormale de silice et former une solution de silice colloïdale, semi-visqueuse, prise en masse compacte par sursaturation (et peut-être ultérieurement recristallisée par une évolution ultérieure). Au contraire, à température plus basse, des solutions beaucoup plus étendues ont pu lentement déposer des enduits cristallins peu à peu grossis et formant des zones concrétionnées à petits éléments sur les parois.

À côté de la silice, nous venons déjà de signaler brièvement ce qui concerne la *calcite*. Parfois, au contact de certaines roches ignées traversant des calcaires, on a vu, dans la production de calcite, un effet direct de métallurgie ignée. Duparc a signalé ainsi, dans l'Oural, des filons de calcite et de mica dans des roches granitiques.

Peut-être pourrait-on signaler à ce propos le cas de White Knob, en Idaho, où nous avons déjà vu qu'il existait, au milieu d'un porphyre quartzifère, des filons ramifiés en forme de tronc arborescent et contenant des silicates calcaires. On pourrait se demander s'il y a eu là apport de chaux empruntée par voie ignée aux calcaires encaissants et déposée

dans des fissures ; mais nous pensons plutôt à des enclaves calcaires métamorphisées.

Dans le cas filonien normal, la présence de calcite s'explique par l'abondance de l'acide carbonique qui paraît, à tous égards, avoir pris une part très active dans ces phénomènes. Cet acide carbonique en excès a pu emprunter de la chaux à tous les terrains quelconques rencontrés en profondeur et par les voies les plus diverses. Pratiquement on rencontre souvent des filons à gangue de calcite dans des terrains qui ne sont nullement calcaires. J'en ai étudié, par exemple, un faisceau dans les grès permien du Suelza. L'origine de la chaux doit alors être tout au moins assez lointaine.

Pour la *barytine* et la *fluorine*, comme nous l'avons vu, l'idée d'une introduction superficielle ayant contribué pour une forte part à la minéralisation s'accroît dans bien des cas.

La barytine, malgré son insolubilité, peut venir cristalliser sur des fossiles ou dans des eaux thermales actuelles ; le fluor s'introduit constamment dans les os, qu'il transforme peu à peu, comme l'a montré Ad. Carnot, en apatite, et, ailleurs, il produit directement de la fluorine par pseudomorphose¹. Dès lors, la mise en mouvement de grandes masses de terrains érodés dans des plateaux anciens comme le Plateau Central ou la Bohême, a pu suffire, par la dissolution des feldspaths barytiques et des éléments chlorurés ou fluorés des roches, pour amener le dépôt de barytine et de fluorine dans des fissures de la superficie, comme elle a produit des dépôts de bioxyde de manganèse, ou des concentrations de manganèse barytique (psilomélane) dans des résidus argileux. On expliquerait ainsi la disparition fréquente de la barytine quand on s'enfonce dans les filons. Mais une telle explication est, surtout pour la fluorine, impossible à admettre dans certains cas. On a des exemples très nets de fluorures abondants, associés à des venues profondes, ou tendant même à dominer en profondeur ; il en est, qui semblent directement émanés de roches éruptives, comme les fluorines avec tellurures d'or de Cripple Creek, au Colorado. On ne peut donc contester qu'il y ait eu souvent apport fluoré venant des roches éruptives en fusion et c'est un point sur lequel nous allons insister en parlant des minéralisateurs. Nous venons également de citer, pour le baryum, les filons profonds de Barytische Blei en Saxe.

3° LES AGENTS DE TRANSPORT. LES FUMEROLLES. ROLE DE L'OXYGÈNE DANS LES GISEMENTS FILONIENS

Rôle des minéralisateurs. — Les métaux seuls n'auraient pas été solubles dans les eaux filoniennes et seraient restés, par conséquent, englobés dans la scorie silicatée, ou, s'ils avaient été vaporisés, se seraient re-précipités à son voisinage tout à fait immédiat. Il a fallu, pour donner de la mobilité aux métaux, l'intervention d'éléments susceptibles de former avec eux des combinaisons volatiles et solubles : éléments

¹ Il se produit de véritables stalactites de fluorine à la mine de Blue John, en Derbyshire, où existe de la fluorine filonienne avec galène. (E.-A. MANTEL. *Irlande et Cavernes anglaises*, 1897, p. 403). Voir plus loin, p. 311.

que l'on a pris habitude, en géologie, d'appeler les *minéralisateurs*.

Nous comprenons, dans cette dénomination, tous les corps qui, soit par leurs composés volatils ou solubles, soit simplement par leur présence à l'état de traces, ont donné lieu de mobilité aux métaux et facilité leur cristallisation. Dans le second cas, on peut les envisager comme de simples *catalyseurs*, c'est-à-dire comme des corps susceptibles de modifier la vitesse d'une réaction chimique sans apparaître eux-mêmes dans les produits résultant de cette réaction. C'est le sens dans lequel, depuis Sainte-Claire Deville, les chimistes entendent d'ordinaire le mot *minéralisateur*¹. Mais, quand ces mêmes métalloïdes interviennent comme agents de transport, le mécanisme de la réaction intermédiaire, par lequel on expliquait autrefois toutes les catalyses, se manifeste nettement et on ne peut plus parler de catalyse.

L'existence de ces minéralisateurs, que l'on a pu parfois supposer inutiles dans les réactions lentement opérées de la nature, n'est pas, pour les produits filoniens, une simple hypothèse puisqu'on trouve, comme nous allons le dire, une série de minéraux cristallisés retenant du chlore ou du fluor et d'autres, comme l'oxyde d'étain, l'acide chromique (combiné au plomb), qui s'expliquent aisément par l'action de la vapeur d'eau sur un chlorure d'étain, un acide chloro-chromique, etc., puisqu'ailleurs les minerais sont essentiellement des combinaisons avec le soufre, le tellure, l'acide carbonique, etc. D'ailleurs, étant donnée la relation tellement vraisemblable des minerais avec les roches éruptives, il est tout naturel de supposer que celles-ci ont pu dégager des vapeurs analogues à celles que l'on constate dans tous les champs d'activité volcanique : d'abord, à haute température, vers 500°; une prédominance de chlorures; puis des sulfures, en se rapprochant de 400°; enfin, jusqu'à la température ordinaire, des mofettes d'acide carbonique, dues, selon toute apparence, à la combustion d'hydrocarbures profonds. Ainsi qu'on le constate dans les éruptions actuelles, les fumerolles dégagées ont dû dépendre de la température du magma et s'appauvrir, à mesure qu'elles s'en éloignaient, dans l'ordre où nous venons de les énumérer.

Le premier des minéralisateurs a dû être l'eau elle-même, qui, à haute température, joue le rôle d'un acide énergique. Il a suffi de cette eau pour entraîner le silicium à l'état de silicate soluble, surtout en présence des carbonates alcalins qui ont dû abonder autour des noyaux alcalins de roches acides. Les autres fumerolles dont nous allons parler avaient bien des chances pour être mêlées de vapeur d'eau, et il a dû en résulter, par l'effet des modifications extérieures, une série de doubles réactions qui expliquent bien des minéraux.

Nous avons déjà nommé les autres éléments que nous classons dans ce groupe : chlore, fluor, bore, phosphore, soufre, tellure, arsenic, antimoine, carbone, etc.

L'action du *chlore* et du *fluor* est très visible, quoique ces éléments, entraînés par leurs combinaisons solubles, aient dû être, pour la plus grande part, éliminés. Nombre de minéraux cristallisés contiennent encore des inclusions de chlorure de sodium (quartz, topaze). Ailleurs, c'est le mi-

¹ Voir plus haut page 21.

néral même qui renferme, dans sa composition, tantôt du chlore dominant comme les apatites norvégiennes, tantôt du fluor plus abondant, comme les apatites du Canada. Et, dans ce cas, on saisit sur le vif l'intervention des agents chlorurants dans la minéralisation; car la production d'apatite filonienne a pu être accompagnée par l'introduction de chlorures sodique et calcique dans les plagioclases des gabbros voisins, avec transformation en wernérite.

Le fluor entre aussi dans la composition de la tourmaline qui est un élément très normal de certaines minéralisations cuprifères, stannifères, aurifères et qui a parfois été introduite en abondance dans les terrains voisins d'un gîte métallifère par une action connexe de sa formation¹.

On a remarqué (et j'ai déjà indiqué plus haut) comment l'intervention des fluorures est probable, même dans des minéraux où le fluor n'apparaît plus, par exemple dans la cassitérite, reproduite par Daubrée au moyen de son intervention et l'on arrive ainsi à la conception classique de tout un groupe minéral, qui aurait été formé par des actions de ce genre, c'est-à-dire dans la dissolution duquel le chlore et le fluor auraient joué le rôle de minéralisateurs. C'est ce groupe si caractéristique, que je décrirai bientôt sous le nom de famille de l'étain et c'est aussi bien souvent le cas de l'or, qui, dans nombre de filons associés à des roches acides, paraît tout à fait assimilable à l'étain, accompagné des mêmes quartz et souvent même, comme à Cripple Creek, au Colorado, des mêmes minéraux fluorés. D'après Daubrée, le fluorure d'étain, qui est stable à haute température, aurait pu agir uniquement par voie volatile et précipitation directe à la rencontre de l'eau sans réelle circulation hydrothermale.

En même temps que les chloro-fluorures et dans le même groupe très actif, qui caractérise des fumerolles très chaudes en relation avec des roches acides et qui disparaît dès qu'on s'éloigne des centres éruptifs, il y a lieu aussi de citer le bore, dont il subsiste des traces dans quelques minéraux silicatés du même groupe, comme la tourmaline, l'axinite, la danburite, et qui, en outre, a été utilisé pour leur synthèse. Le bore est aussi un de ces éléments, que l'on retrouve, après un cycle complet, dans l'eau de la mer ou dans ses produits d'évaporation. Je crois, néanmoins, comme pour le chlore et peut-être plus encore, que c'est une explication insuffisante de supposer tout le bore du volcanisme, des roches ou des filons, emprunté à la mer et qu'une grande partie des fumerolles, où se dégage abondamment ce métalloïde, proviennent d'une réserve profonde, c'est-à-dire qu'elles arrivent pour la première fois au jour.

Je serais également disposé à faire entrer dans le même groupe le *phosphore*, dont j'ai essayé² de mettre en évidence le rôle minéralisateur et dont je viens, à l'instant, de rappeler les rapprochements avec le chlore

¹ J'ai déjà dit comment les réactions chlorurantes ou fluorantes n'appartiennent nullement, comme un monopole, aux manifestations profondes, mais ont été, au contraire, très souvent reproduites superficiellement. A ce dernier ordre de phénomènes se rattachent évidemment les chlorures, bromures, iodures d'argent développés sur des affleurements de filons. De même, la plupart des autres minéralisateurs ont eu, outre leur rôle profond, une action superficielle (phosphates des affleurements plombeux, etc.).

² G. R. Ac. Sc., 1^{er} février 1904.

ou le fluor dans la cristallisation des apatites. Il me suffit de signaler la présence fréquente de phosphates (apatite, amblygonite, wawellite, mon-tebrasite, wagnérite) dans les gites stannifères, ainsi qu'avec l'uranium, le zirconium et les terres rares (xenotime, monazite, etc...).

Le groupe de l'*arsenic*, de l'*antimoine*, du *soufre*, du *sélénium* et du *tellure* correspond déjà à une minéralisation moins active; son influence devient dominante dans les fumerolles moins chaudes et, par suite, la présence de ces métalloïdes dans un gisement, ou leur intervention probable d'après les synthèses, n'impliquent plus de même l'acidité du magma. En fait, on trouve tous ces éléments rassemblés dans les mêmes fractures filoniennes, et, souvent, avec des combinaisons réciproques, telles que les sulfures d'arsenic ou d'antimoine (réalgar, or piment¹, stibine), les sulfo-antimoniures ou sulfo-arséniures de cuivre et d'argent (cuivre gris, argent noir et argent rouge), les sulfo-antimoniures de plomb (boulangérite et bournonite), les sulfo-séléniures de bismuth, etc. Ils font, tous ensemble, partie des mêmes remplissages complexes, dont on a de beaux exemples sur les rameaux secondaires des Alpes, dans les Apennins, les Alpes illyriennes, l'Atlas, la Sierra Nevada, etc., avec association de toute une série de métaux, qui caractérisent essentiellement les filons concrétionnés du groupe sulfuré (plomb, zinc, fer, cuivre, argent, mercure, etc.²). Cependant, l'arsenic et l'antimoine, peut-être aussi le tellure, semblent parfois se distinguer du groupe soufre-sélénium, pour se rapprocher davantage des agents actifs précédemment étudiés.

Ainsi le mispickel, qui est la forme sous laquelle l'arsenic constitue un véritable minéral (sulfo-arséniure de fer), est un élément normal du groupe stannifère. La stibine (sulfure d'antimoine), tout en pouvant intervenir dans les filons sulfurés complexes, s'isole le plus souvent, pour former, avec association de quartz et de mispickel, des filons, tout à fait analogues à ceux d'étain et, comme eux, en relation extrêmement intime avec des roches acides du type granulitique ou microgranulitique. On la retrouve, comme le mispickel lui-même, associée avec l'or dans un genre de gisements, où l'or est à rapprocher de l'étain. Enfin, le tellure d'or se rencontre surtout dans les régions éruptives récentes, comme la Hongrie ou le Colorado, et souvent en association avec des minéraux dérivés des roches acides, tels que la fluorine.

Le *soufre* (généralement accompagné, en petites proportions, par le *sélénium*) est un élément beaucoup plus banal, qui peut se trouver aussi bien et presque aussi abondamment avec les roches basiques qu'avec les roches acides.

Il apparaît déjà, à l'occasion, avec le groupe fluoré, en amenant la cristallisation de quelques sulfures (chalcopyrite, etc...) dans les filons d'étain, de même que les fumerolles chaudes chlorurées des volcans actuels sont

¹ Le réalgar et l'orpiment sont des produits actuels de sources thermales dans les régions volcaniques.

² Les associations de l'antimoine jouent, dans les minerais, un rôle important, souvent dissimulé par les dénominations minéralogiques, où la présence de l'antimoine n'apparaît pas. Il suffit de signaler les stibines avec cinabre et cuivre gris, ou les groupements minéralogiques : antimoine-cuivre-argent; antimoine-argent; antimoine-plomb, etc.

accompagnées de sulfures, en général masqués par leur prépondérance. Et, d'autre part, j'ai déjà dit¹ l'importance que prennent les ségrégations sulfurées de pyrrhotine, pyrite ou chalcopyrite sur la périphérie des roches basiques, dont elles dérivent par un départ immédiat.

Le soufre a été l'élément essentiel des grandes cristallisations hydrothermales, qui constituent les filons concrétionnés, bien que l'on y retrouve encore parfois de la fluorine, comme on observait déjà du soufre avec le groupe stannifère. C'est par la combinaison avec le soufre que les métaux les plus abondants, les plus vulgaires et les plus utilisés en pratique, ont dû être dissous, et apportés dans les filons à l'état, soit de sulfures doubles alcalins, soit de sulfures solubles dans un excès d'hydrogène sulfuré sous pression, soit peut-être de chlorures, qu'un sulfure connexe aurait reprécipités, soit, quand il s'agit d'altérations superficielles, à l'état de sulfates, réduits plus tard par un agent carburé.

Enfin, le *carbone* me paraît, contrairement à une théorie souvent exprimée, avoir joué un rôle important dans la métallurgie interne². J'ai soutenu, à diverses reprises, cette idée qu'il y avait pétition de principe à admettre l'intervention nécessaire de l'activité organique pour expliquer la présence du carbone dans une roche et à prétendre que tout le carbone rencontré en géologie avait nécessairement dû passer par la forme de la vie. Je crois, au contraire, que certains bains métalliques internes doivent présenter des carbures, être de véritables fontes et que ce carbone joue un rôle dans la dissociation profonde de l'eau : dissociation, par suite de laquelle il se combine, d'abord, avec l'hydrogène, tandis que l'oxygène scorifie les métaux ; après quoi, ce carbure d'hydrogène doit se dégager dans les manifestations internes, en donnant rapidement, dès que l'air peut intervenir, de l'acide carbonique et des carbonates alcalins.

Il suffit, d'ailleurs, comme l'a fait A. Gautier, d'analyser une roche éruptive quelconque pour constater que, même en profondeur et sans carbonatation superficielle de la chaux, cette roche contient toujours un résidu de carbone ; la refusion profonde d'une roche ne peut donc manquer, à elle seule, de produire des carbures. Dans le volcanisme, dès qu'on peut recueillir des fumerolles non brûlées, par exemple sous la mer, on retrouve ces carbures, masqués d'habitude par leur combustion.

Il me paraît donc très logique d'admettre que ces carbures d'hydrogène ont dû jouer, dans la précipitation des sulfures, un rôle important, sur lequel je vais revenir dans un paragraphe suivant ; et je suis également porté à penser que les eaux magmatiques devaient être riches en acide carbonique, qui a pu leur permettre d'exercer des actions de volatilisation, de dissolution, de remise en mouvement profonde. Cela conduit à envisager la probabilité que l'acide carbonique liquide sous pression, ainsi que les carbonates alcalins dans l'eau à haute température, aient influé sur un très grand nombre de cristallisations filoniennes. Peut-être même est-ce à eux qu'il faut attribuer l'aspect spécial de certains grands filons

¹ Page 83.

² Ce rôle, que j'attribue ici au carbone, a été autrefois indiqué, en partie, dans une note aux *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* (11 févr. 1903).

de quartz, où l'on croirait voir une prise en masse, comme dans une sur-saturation.

Maintenant sous quelle forme exacte s'est produite cette intervention des minéralisateurs? Elle a dû être double. Tout d'abord, il a dû se former directement des chlorures, sulfures, carbures ou carbonates métalliques qui se sont dégagés à haute température en même temps que la vapeur d'eau et qui se sont condensés avec elle. Mais, en outre, il a dû y avoir formation de chlorures, sulfures ou carbonates alcalins formant, avec les éléments métallifères, des associations solubles. Il est, par exemple, vraisemblable que, dans les filons sulfurés, il a dû circuler des solutions complexes de sulfure métallique dans un sulfure alcalin et dans un excès d'hydrogène sulfuré. Parallèlement avec le rôle des chlorures et avec celui de l'acide carbonique qui se sont exercés sur des gisements d'un type différent, l'hydrogène sulfuré a dû avoir une action très importante dans la minéralisation.

L'*acide sulphydrique* ne reste en dissolution qu'à forte pression, étant peu soluble dans l'eau et peut alors dissoudre les sulfures de plomb, zinc, argent, insolubles dans les sulfures et sulphydrates alcalins, qui se déposeront donc dans une zone relativement profonde, dès que cet hydrogène sulfuré se dégagera. Les calcaires peuvent favoriser cette réaction, parce qu'il se forme du sulfure de calcium et de l'acide carbonique libre. C'est pourquoi peut-être tant de beaux gisements à sulfures complexes de l'Ouest américain et du Mexique sont encaissés dans des calcaires.

Plus haut et plus tard, à moindre température, les sulfures et sulphydrates métalliques forment, avec les sulfures d'arsenic et d'antimoine, des sulfosels qui facilitent la dissolution des sulfures d'argent et de cuivre, d'où pourront se précipiter ensuite les cuivres gris, etc., et cette réaction contribue à former, par un mouvement de bas en haut, ce que nous appellerons, avec intervention des actions de haut en bas, une zone de cémentation.

A température encore moindre persistent les sulfures de fer, arsenic, antimoine et mercure.

On aurait ainsi, pour les sulfures, l'ordre de dépôt suivant, qui correspond assez bien aux profondeurs de cristallisation moyenne : blende, galène et pyrite; cuivre gris et argent noir; cinabre, pyrite, stibine, réalgar. S'il s'est déposé des sulfures d'argent, cuivre, etc., dès la première phase, ils ne seront pas stables et pourront être déplacés.

Rôle de l'oxygène dans les filons. — S'il est, en métallogénie, un phénomène bien net et dont on doit avant tout tenir compte dans les théories, c'est le caractère réducteur qui s'accuse d'ordinaire dans tout ce que nous pouvons savoir des milieux profonds. Pour la presque totalité des minerais, les combinaisons oxydées sont des produits d'altération ultérieure, dont il est facile de reconnaître le caractère superficiel et qui disparaissent dès que l'on s'enfonce. Il ne saurait y avoir de doute à cet égard en ce qui concerne les filons de plomb, de zinc, de cuivre, de nickel, de cobalt, de bismuth, d'argent, de mercure, d'antimoine, de molybdène, pour lesquels la limitation profonde des cérusites, anglésites, calamines, malachites, azurites, etc., a été partout constatée. Le type profond de tels gisements

est, en principe, la combinaison sulfurée, avec substitution possible au soufre des autres éléments jouant un rôle analogue, comme l'arsenic, l'antimoine, le sélénium, le tellure, etc... et l'on peut seulement se demander, dans ce cas, si l'apport s'est réellement fait en sulfure ou si la cristallisation résulte d'une précipitation opérée par l'hydrogène sulfuré ou un sulfure alcalin sur un autre composé dissous, tel que le chlorure ou le fluorure.

Pendant ce que nous venons de dire pour les principaux métaux n'est pas exact pour tous et reste douteux pour quelques-uns. On ne saurait s'en étonner, même en demeurant fermement convaincu que le milieu interne est réducteur. La présence de l'oxygène libre, ou celle de l'eau (qui doit devenir en profondeur un élément oxydant immédiat) sont, en effet, suffisamment prouvées par l'existence, jusqu'aux profondeurs les plus grandes atteintes par nos investigations, d'une croûte silicatée, dans laquelle l'oxygène entre pour moitié, combiné avec des métaux qui existent presque uniquement à l'état d'oxydes (métaux alcalins et alcalino-terreux, aluminium, etc.). Il en résulte aussitôt, comme nous l'avons vu¹, que l'oxygène caractérisait au début la zone de notre planète où s'est opérée la consolidation, et une partie de cet oxygène avait nécessairement dû se répandre par diffusion dans les zones voisines. Il peut donc y avoir encore quelques réserves inépuisées d'oxygène profond, et surtout l'oxygène des roches traversées par les venues métallisantes, l'eau à laquelle on est forcé d'attribuer une grande part dans leur production, sont également des sources d'oxygène toutes naturelles, qui ont pu réagir, par double décomposition, sur les composés de ces métaux avec des halogènes.

Les cas les plus nets d'oxydation profonde pour les métaux filoniens concernent : 1^e la famille de l'étain (étain, tungstène); et 2^e un groupe moins nettement défini comprenant fer, chrome, titane, zirconium, vanadium, cérium, tantale, etc., groupe dans lequel nous faisons entrer des métaux parfois rattachés à l'étain, mais pour nous très différents.

L'étain forme bien un sulfure complexe avec association de cuivre, fer et zinc, la stannine; mais c'est une simple curiosité minéralogique et il n'y a aucune raison pour faire intervenir le sulfure d'étain dans l'apport de ce métal. Quant au tungstène, il n'est connu qu'à l'état de combinaisons oxydées, wolfram, hubnérite, schééelite, cupro-schééelite. Il y a toute raison d'admettre, dans ces deux cas, suivant l'hypothèse classique de Daubrée, l'intervention de chlorures ou fluorures volatils décomposés en présence de l'eau. Et c'est l'explication que nous admettons d'une façon générale pour les oxydes filoniens profonds.

Quant aux oxydes des inclusions et ségrégations, comme le fer, le chrome, le titane, etc., on peut les attribuer à une scorification directe de métaux natifs, analogue à celle qui a dû porter sur le silicium, l'aluminium, les métaux alcalins, etc.

Dans la famille du fer, il existe également des cas où les oxydes résultent sans conteste de l'action du chlorure sur l'eau : par exemple les oxydes de fer des bombes volcaniques, dont il faut rapprocher le chlorure de plomb trouvé au Vésuve.

¹ Page 17.

Enfin, des cas douteux se présentent pour le fer, le manganèse, le baryum, le strontium, etc., à l'occasion desquels il peut y avoir lieu de discuter, comme nous l'avons déjà dit¹, l'idée d'une oxydation par altération superficielle d'autres minerais disparus.

4° ACTIONS PRÉCIPITANTES

Il ne suffit pas d'expliquer comment des métaux ont pu se trouver en dissolution dans les eaux thermales; il faut encore se rendre compte comment ces eaux ont été amenées à les précipiter et à donner des précipités stables, non ultérieurement déplacés par la circulation hydrothermale continuée.

D'après la façon dont nous avons envisagé la métallisation filonienne, nous nous représentons, au-dessus d'un champ d'intrusion ignée interne, des dégagements de fumerolles, qui se sont éloignés plus ou moins loin dans l'espace, mais aussi qui se sont succédé dans le temps. Ainsi, dans une fissure où ont pu circuler d'abord des chlorures en prédominance et où ces chlorures auront été amenés à se précipiter, il aura pu circuler postérieurement des eaux chargées de sulfures ou d'acide carbonique agissant sur les premiers précipités. Ailleurs, où les chlorures n'avaient pu arriver, mais où s'étaient d'abord déposés des sulfures, l'acide carbonique sera également venu ensuite. Ces changements dans la minéralisation des eaux ont dû être accompagnés de déplacements, qui ont eu pour effet général de remonter progressivement vers la superficie les éléments solubles dans les eaux les plus récentes, en laissant dans la profondeur ceux qui, une fois précipités par les eaux anciennes, n'étaient plus susceptibles d'une telle remise en mouvement. Et plus d'une apparence actuelle des gisements, plus d'une variation en profondeur doit être attribuable à cette action ultérieure des eaux ascendantes, dont nous dirons quelques mots dans un paragraphe suivant, nous bornant ici à envisager les causes de la précipitation définitive.

Ces causes de précipitation nous sont assez mal connues pour la raison que nous ignorons, le plus souvent, les circonstances les plus importantes du phénomène : la profondeur et la distance du magma éruptif, c'est-à-dire la température et la pression, la nature des éléments dissous et de ceux rencontrés sur le trajet. On peut cependant essayer de reconstituer ce qui a dû se passer.

Parmi les causes de précipitation, on pense aussitôt à un changement dans les conditions de température et de pression pouvant résulter, soit de la rencontre d'autres eaux plus froides, soit du voisinage de la superficie, soit d'une modification dans les dimensions de la fissure, etc. Autrefois on admettait, presque sans discussion, l'influence de la surface. Celle-ci a dû se faire sentir, en effet. Mais peut-on l'étendre à des profondeurs qui, dans les conditions actuelles, dépassent 1 000 m. et qui, avant les érosions par lesquelles la partie haute des gisements a été partout enlevée, atteignaient peut-être le double? Si cette influence était la principale, n'observerait-on pas, en outre, des modifications réglées

¹ Page 135.

par une loi théorique constante dans les variations originelles des filons en profondeur, tandis qu'en fait presque toutes les variations observées sont dues à des remises en mouvement tout à fait secondaires¹.

Une autre cause de précipitation connue est la saturation. Les eaux métallisantes, qui recevaient des apports par la base, ont dû avoir une tendance à présenter une richesse croissante de haut en bas, et il a pu, à un moment donné, en résulter une prise en masse de bas en haut sur toute la hauteur d'une paroi².

On doit ensuite penser à la réaction chimique d'autres substances, soit amenées dans la fissure normale, soit provenant d'une fissure transversale (d'où une des raisons pour l'influence, souvent constatée, des croiseurs), soit enfin contenues dans les parois. Ainsi, pour les gisements de cuivre du Lac Supérieur, on a parfois admis que la magnétite contenue dans les mélaphyres encaissants avait pu exercer une action de cémentation. Dans d'autres cas, c'est la rencontre de certaines couches qui a déterminé la précipitation.

Cette action précipitante paraît avoir été rarement une électrolyse, quoiqu'on ait pensé bien des fois à cette explication. Du moins l'on n'a jamais encore démontré nettement l'intervention de ce phénomène. Par exemple pour l'argent de Kongsberg, cette idée est inadmissible, puisqu'il est prouvé que la majeure partie de ce qui est aujourd'hui de l'argent natif a commencé par être du sulfure de l'argent ou de l'argent rouge.

Parfois l'enrichissement s'est fait à la rencontre de certaines zones favorables, ou fahlbandes, généralement chargées de pyrites et parfois imprégnées de matières charbonneuses : zones qui ont déterminé la précipitation des minerais dans les filons transversaux, restés stériles sur le reste de leur parcours. Les fahlbandes pyriteuses de Kongsberg, recouvertes par des filons argentifères, en sont un cas bien connu. De même, les « indicators » de Ballarat en Australie, ou les schwebende d'Annaberg.

A cet égard, les hydrocarbures jouent un rôle tout à fait spécial. Nous avons déjà vu comment des hydrocarbures et de l'acide carbonique avaient dû prendre part à la minéralisation, soit ignée, soit hydrothermale. Des hydrocarbures ont également souvent agi comme précipitants ; et, dans certains cas, il est difficile de dire, en trouvant des composés carburés dans un filon ou un gîte métallifère, si leur présence se rattache à l'une ou à l'autre cause (apport connexe ou rencontre de précipitants). Mais souvent aussi leur rôle de précipitant est net.

Ainsi, pour les filons mercuriels, on constate très souvent que des hydrocarbures contenus dans les terrains voisins ont déterminé le dépôt du cinabre. Dans les filons d'argent de Kongsberg, la calcite argentifère est toujours une calcite légèrement bitumineuse, au point que le fait est passé en axiome pour les mineurs, et les filons renferment, en même temps, une matière charbonneuse, dite anthracite. Dans le district de

¹ Nous envisagerons ces déplacements quand nous parlerons de l'évolution ultérieure des minerais et de leur remise en mouvement, pages 161 et 168.

² En 1844 J. FOURNIER publiait dans les *Comptes Rendus* (t. 18, p. 1050 à 1057), un long mémoire, dans lequel il s'efforçait de montrer que la cristallisation des filons métallifères résultait simplement d'une surfusion du quartz, seule susceptible d'expliquer les emboitements réciproques de substances semblables s'englobant en sens inverse.

Freiberg, les filons argentifères (Edle Quarz) étaient particulièrement riches dans ce qu'on appelait le Schwarze Gebirge, masse irrégulière d'une sorte de schiste charbonneux et les mêmes filons s'appauvrissent en pénétrant au voisinage dans le schiste micacé. A Annaberg, une influence enrichissante est exercée par des zones d'écrasement interstratifiées dans les gneiss, sortes de fahlbandes que l'on appelle là les Schwembende (Rampants), où l'on trouve, non seulement de la pyrite, mais surtout des matières finement terreuses riches en charbon.

Dans des conditions toutes différentes, les minerais plombo-zincifères du Mississipi ont été clairement précipités par une réduction due aux hydrocarbures pétrolifères du terrain encaissant (Oil rock du Wisconsin). Ainsi encore pour les minerais de cuivre permo-triasiques déposés sur des végétaux carbonisés, ou dans des couches bitumineuses comme les schistes cuprifères du Mansfeld. J'ai signalé autrefois un cas analogue pour les conglomérats aurifères de Buffelsdoorn au Transvaal, où abonde une matière carburée.

En ce qui concerne cette action réductrice, Jenney¹ a essayé de calculer le pouvoir réducteur relatif de diverses substances. Celui de l'hydrogène passant en eau étant compté pour 100, il a trouvé : pour le pétrole, 43,36 ; pour le carbone donnant de l'acide carbonique, 33,33 ; pour l'acide humique, 18,04 ; pour le carbone donnant de l'oxyde de carbone, 16,67 ; pour l'hydrogène sulfuré, 23,53 ; pour la pyrite passant à l'état de sesquioxyde, 12,50 ; pour la blende passant à l'état de sulfate, 8,25 ; pour CO devenant CO², 7,14 ; pour la galène, 3,35.

Des expériences faites au Service géologique des États-Unis ont montré encore que les sels métalliques en dissolution sont précipités de suite par des minéraux pulvérisés, par exemple l'orthose ou la hornblende.

Enfin, on ne doit pas omettre de signaler ici l'influence enrichissante bien connue des *croiseurs*. Les colonnes riches, qui se produisent à la rencontre de deux fractures, peuvent être dues à bien des causes : élargissement de la fente et production d'une colonne de moindre résistance ; action d'un premier remplissage sur un second ; peut-être aussi circulation dans la fracture transversale d'eaux, soit chaudes et ascendantes, soit froides, ayant exercé une action de concentration. On a beaucoup étudié ces phénomènes en Saxe, où on s'est attaché, comme nous le dirons à propos de Freiberg, à montrer les étapes successive du remplissage. Mais peut-être y a-t-on un peu oublié l'évolution ultérieure des minerais, en admettant sans examen que les conditions de dépôt originelles étaient identiques à leur état présent.

Nous aurons à revenir sur ce point à propos des remises en mouvement.

5° REMISES EN MOUVEMENT IMMÉDIATES

Nous avons déjà fait remarquer que, dans un phénomène de dépôt filonien, on ne devait nullement considérer comme définitive une cristallisa-

¹ 1903. JENNEY. *The chemistry of Ore depos.* (Tr. Am. Inst. min. Eng., t. 33, p. 445-498). — J'ai autrefois étudié l'action réductrice probable des hydrocarbures sur des oligistes de Grängesberg (Suède), localement transformés en magnétite (C. R., 11 févr. 1903).

tion réalisée et nous consacrerons plus loin deux chapitres X et XI à cette transformation ultérieure des minerais, dont nous nous contentons ici de signaler la première étape. Il a suffi, en effet, que la composition des eaux circulant dans la fracture se soit modifiée dans le sens voulu pour que des réactions inverses aient pu avoir lieu et que les précipités se soient redissous pour aller se précipiter plus loin. De telles réactions ont pu se prolonger aisément tant que la fracture n'a pas été incrustée sur toute sa largeur, tant qu'il y a subsisté un vide central, par lequel pouvaient continuer à monter des eaux chaudes et actives. Plus tard, les réactions ont dû se ralentir, sans que, pour cela, elles aient été nécessairement terminées. Des forces lentes, en présence de l'eau qui imprègne toutes les fissures de la profondeur, ont pu continuer leur action; et surtout il a pu se réaliser des réouvertures, dont nous avons tant d'exemples et dont témoignent notamment tant de sources thermales situées aujourd'hui sur d'anciens filons métallifères. Nous laissons de côté ici ces dernières réactions, ainsi que le métamorphisme ultérieur et les remises en mouvement superficielles par les eaux descendantes étudiées aux chapitres x et xi et nous n'envisageons que le premier cas, commencé par l'ouverture de la fente filonienne, terminé par son obstruction dans un premier remplissage.

Dans cette seule période, la transformation des fumerolles, accusée si souvent par la succession des dépôts concrétionnés, a pu provoquer des redissolutions ayant toujours pour effet un déplacement de bas en haut, une remontée des premiers dépôts jusqu'à une zone où se trouvait ainsi réalisée une concentration. Même quand un filon déterminé offre un remplissage unique, il arrive de rencontrer côte à côte, deux minces fissures voisines et parallèles évidemment remplies dans une même période minéralisatrice et contenant deux remplissages tout différents. Entre cent autres cas de ce genre, Villarellós a décrit, au Mineral de Panuco e Grenade (Durango), des veines de blende argentifère juxtaposées avec des veines de pyrite et argent rouge. Cette observation, qui est en opposition avec une théorie d'après laquelle la direction d'un filon devrait faire présumer son remplissage, concorde, au contraire, avec les variations constantes d'un même filon dans sa longueur. On peut en conclure que les fumerolles métallisantes étaient très variables d'un point à l'autre, comme d'un instant à l'autre, tout en se maintenant dans un même groupe de métaux. Et, par suite, il suffit d'imaginer un très faible déplacement, soit de ces fumerolles elles-mêmes, soit de leurs eaux de condensation, pour qu'il soit arrivé, au même point du filon, des solutions toutes différentes, inégalement chaudes, etc., et que la dernière ait pu redissoudre la première.

Naturellement, plus la fissure était mince, moins ces redissolutions avaient chance de se produire : la fissure rapidement obstruée ne livrant plus passage à d'autres eaux. C'est une des raisons pour lesquelles nous trouvons certains éléments solubles localisés dans des fissures très minces, tandis qu'ils n'auraient pas subsisté dans des fissures plus larges. où, d'autre part, ils avaient moins de chances de se déposer. Le cinabre et les minerais d'argent riches en fournissent des exemples tout à fait typiques, en même temps qu'ils témoignent ailleurs d'une remontée générale vers le jour, tenant à la même cause.

6° INFLUENCE DES REMPLISSAGES FILONIENS SUR LES ROCHES ENCAISSANTES. IMPRÉGNATION, PROPYLITISATION, KAOLINISATION, ETC.

Si l'on admet, ce qui est naturel, que la composition chimique des parois ait pu exercer une influence sur la précipitation des minerais, il a dû en résulter une action inverse des eaux métallisantes sur ces parois. Cette action se traduit souvent par des imprégnations ou substitutions métallifères, surtout dans les calcaires; parfois aussi, comme nous l'avons vu, par la production de silicates du type Banat. J'ai parlé également du développement de la topaze, de la tourmaline, etc., au voisinage de certains filons stannifères ou cuprifères. Nous étudierons plus tard la production des greisen qui accompagnent ces filons d'étain. Mais on a pu se demander en outre si certaines altérations, souvent constatées au voisinage des filons, n'avaient pas une origine de ce genre, et la question se posait surtout si on admettait l'hypothèse d'une sécrétion latérale.

Ces phénomènes d'altération propres aux zones filoniennes (phénomènes qui offrent d'autre part un intérêt pratique pour l'exploitation des filons) sont de deux types différents : les uns offrant un certain caractère profond et connus sous le nom de propylitisation; les autres, superficiels, se ramenant surtout à une kaolinisation.

a) **Propylitisation**¹. — On a, depuis longtemps, remarqué que le type des filons quartzeux auro-argentifères, si remarquablement répandu dans les chaînes tertiaires, en Hongrie, dans l'Ouest Américain, au Mexique, etc., est constamment associé avec une altération des roches encaissantes qui a eu pour effet d'y développer la chlorite aux dépens de l'amphibole ou du pyroxène et d'en faire ainsi des roches vertes, des grüstein, appelés, dès le xviii^e siècle, Saxum Metalliferum. Ces roches vertes, dont l'origine peut être très diverse et qui comprennent notamment beaucoup d'andésites à hornblende, sont ce qu'on appelle les propylites.

La propylitisation, qui peut très bien exister en dehors de tout filon métallifère, passe progressivement à la séricitisation qui, suivant Lindgren, s'en distingue par la moindre teneur en acide carbonique des eaux agissantes. On l'a surtout étudiée dans les andésites, par exemple au Comstock et à Schemnitz; mais elle se retrouve aussi dans des diabases, microgranites, etc.

Il faut aussitôt remarquer, pour éviter des confusions, que, dans son mode d'extension comme dans son processus, la propylitisation ne se confond pas avec la kaolinisation qui a pu souvent se superposer à elle. La propylitisation porte sur des massifs étendus et paraît, d'après Szabo, partir du fond, du centre des massifs pour gagner vers la périphérie. Elle a pour effet essentiel la transformation de la hornblende et du pyroxène en une association de chlorite vert pomme et de calcite. Le feldspath, au contraire, et le mica noir, demeurent inaltérés, à moins qu'il ne se soit superposé à cette première réaction de profondeur une autre réaction,

¹ 1906. BELA DE INKEY. *De la rel. de l'état propylitique des roches andésitiques et leurs filons minéraux* (Cong. Mexico, 502).

qui se produit lorsqu'une propylite se trouve exposée à l'air ou lorsque, le long d'un filon métallifère, elle a été soumise à la circulation des eaux aérées : une kaolinisation, dans laquelle elle blanchit, jaunit et tombe en boue.

Dès lors, on doit concevoir cette propylitisation comme un phénomène de profondeur, qui s'est fait sur la roche déjà solidifiée, mais longtemps avant la réaction de surface. L'agent qui semble avoir pu le plus simplement opérer ce phénomène est l'acide carbonique. Comme, d'autre part, les roches propylitisées sont presque toujours imprégnées de pyrite, il nous semble naturel d'imaginer qu'à un moment quelconque, pendant la métallisation filonienne, des fumerolles carburées et sulfurées, issues du magma profond métallisant, ont pénétré dans les roches sur de larges zones (sans être pour cela en connexion nécessairement directe avec les filons métallifères); et il n'y aurait rien de surprenant à ce que, avec la pyrite, il se fût introduit d'autres métaux sulfurés dont on doit retrouver la trace dans la roche propylitisée plus que dans la roche intacte : ce qui a été en effet maintes fois constaté.

On a cependant interprété les faits en sens inverse en supposant que, dans la propylitisation, les métaux avaient été empruntés à la roche pour être concentrés dans le filon. Cette seconde hypothèse ferait intervenir l'eau dégagée par la fusion ou le ramollissement des roches. Si les traces de métaux n'étaient pas aussi infinitésimales, la question devrait pouvoir être tranchée en examinant si les chlorites des propylites contiennent plus ou moins de métaux que les amphiboles intactes correspondantes, à la condition toutefois de ne pas opérer sur des roches décomposées par la séricitisation ou la kaolinisation, qui sont toujours particulièrement intenses au voisinage des filons métallifères en raison des eaux acides fournies par eux.

b) Kaolinisation, séricitisation. — Au voisinage des gisements métallifères, les roches ont souvent subi en outre une altération qui prend la forme de la kaolinisation. Comme la propylitisation dont nous venons de parler, cette kaolinisation n'est nullement liée d'une façon nécessaire au contact des filons métallifères. Mais les régions métallisées ont eu toutes les raisons pour être spécialement altérées sous ces deux formes : d'abord, parce qu'elles avaient une tendance spéciale à se fissurer ; puis, parce que, situées souvent dans les régions de roches éruptives où le degré géothermique est plus faible, elles offrent des circulations plus abondantes de sources thermales, dont beaucoup ramènent encore au jour de l'acide carbonique ou de l'acide sulfhydrique en rapport avec le volcanisme ; enfin parce que les grandes masses sulfurées, au contact desquelles circulaient les eaux, soit ordinaires, soit thermales, avaient nécessairement pour effet de les acidifier et, par conséquent, d'augmenter leur action.

Il existe des exemples très remarquables de semblables kaolinisations, poussées parfois jusqu'à une grande profondeur et donnant un type de minerais tout à fait particuliers. Nous décrirons plus tard les kaolins grenatifères riches en argent de Broken Hill. De même, en petit, le long du filon de galène de Pontgibaud, on a observé une kaolinisation marquée des granulites.

C'est, d'ailleurs, un fait constant que l'altération des terrains le long des filons, même non métallifères, qui ont constitué des plans de drainage pour les eaux souterraines. Le long de tous les filons quartzeux du Plateau Central, on observe une altération semblable, qui arrive parfois à rendre le terrain encaissant méconnaissable sur 50 m. de large quand il était composé de schistes ou micaschistes facilement altérables. On sait également que, dans la pratique des recherches minières, un affleurement métallifère, quand il ne se manifeste pas par un mur de quartz, se traduit souvent par une matière boueuse, d'où les minerais, à l'exception d'un peu de galène, ont pour la plupart disparu, et souvent ces argiles ou ocres superficielles, qui n'ont aucune apparence de minerais, sont cependant riches en argent.

CHAPITRE VIII

CONDITIONS DE DÉPÔT DES REMPLISSAGES FILONIENS

1° TYPES DIVERS DE REMPLISSAGES HYDROTHERMAUX. FILONS CONCRÉTIONNÉS OU NODULEUX. IMPRÉGNATION LATÉRALE. LENTILLES. CHEMINÉES DE MINÉRALISATION. — 2° DURÉE DU REMPLISSAGE. TEMPÉRATURE DE CRISTALLISATION. — 3° GROUPEMENT DES MINÉRAIS ET SUCCESSION DES REMPLISSAGES DANS UN MÊME FILON. — 4° VARIATIONS EN DIRECTION ET EN PROFONDEUR. — 5° LIMITATION VERTICALE DES REMPLISSAGES FILONIENS.

Les phénomènes de départ, de circulation hydrothermale, enfin de précipitation, que nous avons essayé d'étudier jusqu'ici, ont pour conséquence le dépôt des minerais suivant un certain nombre de types que la pratique a soigneusement étudiés et dont on a cherché maintes fois à démêler les lois de variation.

1° — STRUCTURES DIVERSES DES REMPLISSAGES HYDROTHERMAUX

Nous examinerons tout à l'heure la nature des minerais déposés dans les remplissages filoniens, leur composition intime et leurs associations. Si nous nous bornons d'abord à la structure de ce dépôt, il faut envisager, comme le type, sinon le plus fréquent, du moins le plus caractéristique, d'un remplissage hydrothermal, ce qu'on appelle un filon concrétionné.

Filons concrétionnés. — Parfois on a, dans une fracture nettement limitée par deux épontes stériles, le long desquelles peuvent exister des salbandes argileuses, un certain nombre de zones minéralisées parallèles qui, dans le cas le plus théorique, se répètent symétriquement sur les deux parois en laissant des vides géodiques suivant l'axe. Ces minerais, qui se sont succédé dans un certain ordre sur lequel nous allons revenir, ont visiblement été précipités sur des parois verticales formées, d'abord de la roche encaissante, puis d'une minéralisation antérieure, avec une épaisseur qui, en moyenne, reste la même sur la hauteur d'un filon, ou qui, du moins, ne paraît pas subir de loi de variation théorique. Dans l'axe, il subsiste souvent des vides, des druses, où ont pu cristalliser des minéraux en plus gros éléments. L'impression très nette est donc celle d'une série de précipitations effectuées sur une fente progressivement rétrécie par suite de

modifications successives, soit dans la minéralisation des eaux, soit dans les conditions extérieures de la précipitation. Souvent, par suite d'une de ces réouvertures que nous avons déjà notées comme fréquentes, le filon, une fois rempli, s'est fendu de nouveau, soit suivant son axe, soit plutôt suivant un plan dissymétrique par rapport aux deux parois. On constate alors des successions de remplissages inégales qui, étudiées avec soin, permettent de reconstituer la série de ces phénomènes.

Ce type de filons concrétionnés paraît spécialement net dans les cas où les conditions de dépôt hydrothermal se rapprochaient de celles qui

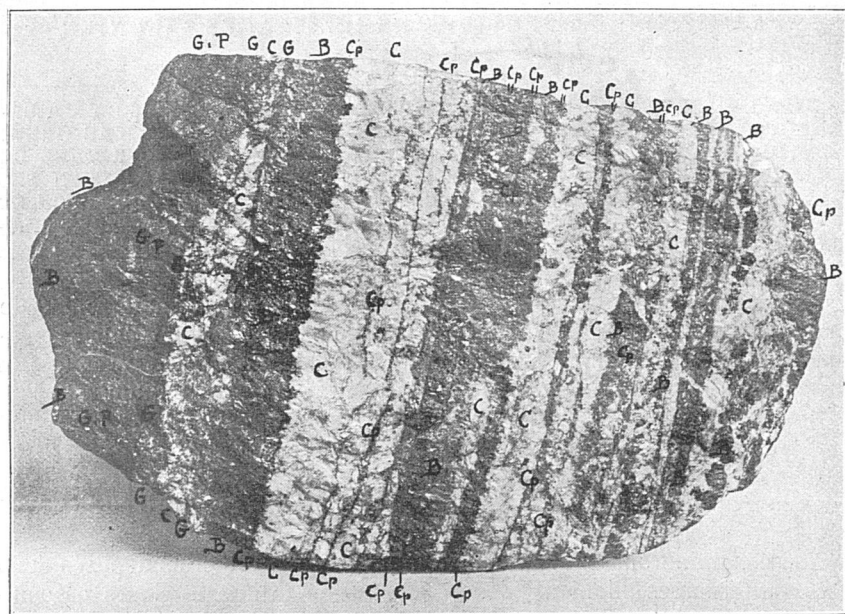


Fig. 11. — Type de filon rubané du Harz avec nombreuses alternances de calcite (C), de blende (B), de galène (G), de pyrite (P) et de chalcopyrite (Cp).

ont lieu dans nos eaux actuelles. Relativement rares pour des minerais accompagnés seulement de quartz, ils sont beaucoup plus fréquents quand interviennent les carbonates, la barytine, la fluorine, etc. On passe alors à des types de remplissages rubanés à bandes multiples. Le cas que nous reproduisons (fig. 11), est celui d'un filon à gangue calcaire tiré du Harz. Au Suelza, nous avons pu étudier un beau filon zincifère, où, sur 5 à 6 mètres d'épaisseur moyenne, se répétaient de même, avec rôle dominant de la calcite, des alternances nombreuses de pyrite, blende, galène, etc¹. Mais, dans les meilleurs types de ces filons, il est bien rare que les conditions théoriques précédentes soient réalisées. Ce que l'on observe le plus souvent, c'est, comme au Suelza, dans une fracture assez vaste pouvant avoir plusieurs mètres de large, des quantités de veines minces de un à dix cen-

¹ Voir plus loin, page 163.

timètres au plus, sans continuité individuelle quoique formant des faisceaux, des écheveaux relativement continus qui se succèdent dans un ordre quelconque. Quand on regarde alors en détail, on verra, par exemple, des cristaux de galène englobés dans de la calcite, comme si le sulfure de plomb précipité était resté noyé dans une liqueur de carbonate de chaux cristallisée ultérieurement, puis des veines de blende ou de pyrite alternant avec cette calcite, etc.

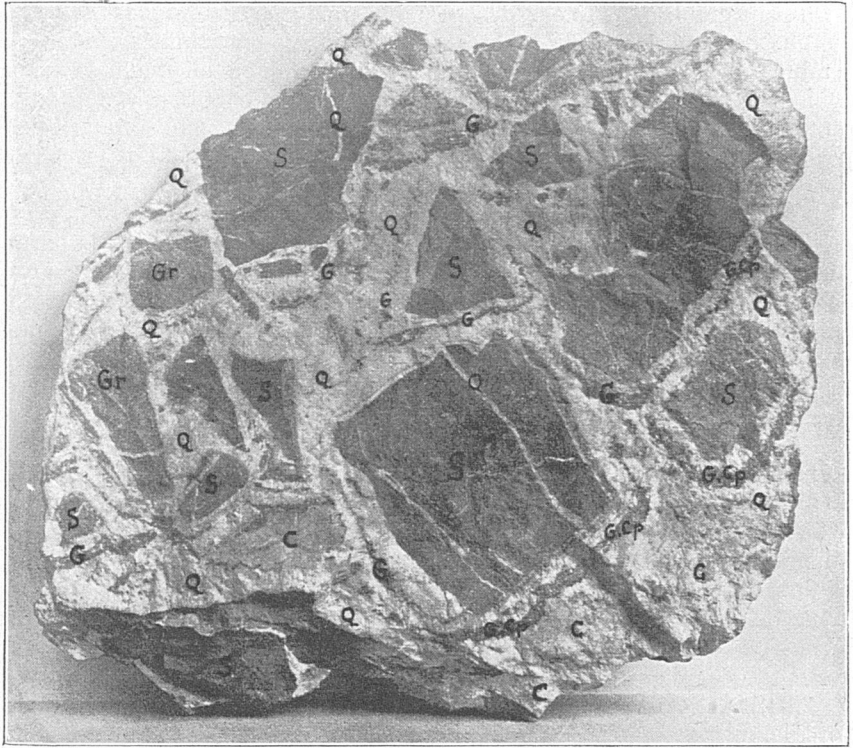


Fig. 12. — Type de filon bréchiforme provenant de la mine Ringeurde, près Zellerfoll. S, schiste; Gr, grès; Q, quartz; G, galène; Cp, chalcopryrite.

Filons bréchiformes. — Dans certains cas, le filon incrusté, au lieu d'être vide, contenait déjà, lorsque le remplissage y a pénétré, une brèche de fragments empruntés aux parois ou à un remplissage antérieur. C'est ce qui arrive très fréquemment pour des filons dont la largeur colossale étonne d'abord, comme ceux du Comstock.

Le remplissage affecte alors souvent (fig. 12), autour de chaque fragment, des zones concrétionnées analogues à celle que nous signalions tout à l'heure, le long des parois, et tout le filon prend un aspect tigré ou moucheté.

Filons confus. — Il arrive également qu'au lieu d'être concrétionnés par

dépôts successifs, les minéraux semblent avoir été précipités, sinon simultanément, du moins dans une même période, l'un d'eux pouvant en englober d'autres comme s'ils appartenait à une même phase. Ainsi, dans un remplissage de cassitérite, quartz et mica, qui constitue le cas ordinaire d'un filon stannifère, il n'y a le plus souvent pas plus de concrétions successives que dans un filon de pegmatite¹.

On retrouve ainsi du quartz galénifère, aurifère, argentifère, englobant de fines particules de minerais disséminés.

On peut enfin, dans le cas des grandes fractures tectoniques, avoir un remplissage quartzeux qui ne présente plus de zones rubanées, mais qui semble avoir été pris en masse d'un seul coup, ou du moins résulter d'une série de prises en masse, redислоquées ensuite et reprises dans un remplissage ultérieur. Cette forme, très spéciale aux filons quartzeux, paraît accuser un mode de précipitation différent de celui de la calcite et probablement plus rapide.

Stockwerks. — Au lieu d'un filon simple, nous avons vu, dans la partie mécanique de cette étude, que l'on pouvait avoir aussi un filon composé formé de veines multiples. Plus celles-ci sont minces, plus elles ont naturellement de tendance à avoir été remplies d'un coup par un remplissage unique. Le filon prend alors l'aspect d'une roche injectée en tous sens d'une matière métallifère. Ces filons composés aboutissent à des stockwerks.

Imprégnation latérale. — Dans beaucoup d'autres cas, la métallisation ne s'arrête en aucune façon à une paroi tranchée comme celle que nous avons supposée jusqu'ici. Il y a, au contraire, pénétration progressive des minerais dans les éponges et il devient impossible de préciser à quel endroit le filon se termine. La limite n'est plus déterminée que par des conditions industrielles d'exploitabilité. Beaucoup de grandes épaisseurs filoniennes citées dans les descriptions se rapportent à un phénomène semblable.

Lentilles et cheminées. — Si, au lieu d'envisager la coupe d'un filon, nous le suivons maintenant en direction, nous observons presque toujours que les minerais utiles y sont distribués par paquets ou lentilles (comme cela se reproduit en petit dans un échantillon) sur la longueur du filon. Pour certains minerais, ces paquets de minerais sont de très petite dimension; ce sont de simples mouches, comme on en rencontre fréquemment pour l'étain; ce sont des lentilles de quelques mètres, comme dans la plupart des filons d'antimoine. Mais, pour les grands filons plombo-zincifères, argentifères ou aurifères, on retrouve quelque chose d'analogue. Une galerie de niveau suivant la longueur d'un filon traversera souvent 100 ou 200 mètres d'une zone stérile, où le filon est entièrement coincé ou sans minerais avant de retrouver une poche d'enrichissement. Sur les coupes longitudinales de filons, dont nous donnerons de nombreux exemples, à Pontpéan, à Linares, à Broken Hill, au Comstock², il en résulte que les parties

¹ Voir à ce sujet, au tome II, la fig. 130.

² Voir au tome III les figures 349, 354 à 358, 450, etc.

riches, mises en évidence par le développement des exploitations, forment des lentilles de forme compliquée, que l'on appelle souvent des cheminées. Ce nom tient à ce que les lentilles en question peuvent affecter une inclinaison, qui se reproduit parfois pour toutes les lentilles d'un même filon et qui tient, ou aux conditions du terrain encaissant, ou au mode d'arrivée des métaux.

2° — DURÉE DU REMPLISSAGE ET TEMPÉRATURE DE CRISTALLISATION

Durée du remplissage. — Le phénomène qui a déterminé l'incrustation des filons métallifères a pu procéder, dans certains cas, pour des métallisations individuelles, par précipitation brusque à la façon des sursaturations. Mais, ailleurs, on a constamment la preuve que des réactions analogues se sont poursuivies pendant une période de temps prolongée.

Une série unique de précipitations aurait pu, en effet, donner des sulfures déposés par zones dans l'ordre inverse de leurs solubilités ; mais, même en faisant intervenir les lois de Van'thoff sur les solutions complexes, on n'arrive pas à expliquer des séries compliquées comme celles signalées plus haut et sur lesquelles nous allons revenir¹, si on n'admet des variations réitérées dans la composition des eaux et dans les conditions extérieures et si l'on ne suppose par suite une certaine durée.

D'autre part, on a la preuve d'un phénomène prolongé, interrompu à diverses reprises par des mouvements du sol, quand on voit, ce qui est le cas presque général, un remplissage disloqué, englobé et cimenté par un remplissage nouveau (brèches quartzesuses, etc.). On observe de même des fragments de galène et de blende entourés par une venue postérieure. Dans les filons d'étain, il est également fréquent de trouver des cristaux de quartz ou de cassitérite éclatés et repris dans d'autres cristaux de la même substance. Tous ces phénomènes peuvent sans doute s'interpréter par comparaison avec des sources thermales de régions volcaniques incrustant un terrain qui continue à se disloquer pendant le remplissage et rien ne prouve, jusqu'ici, qu'il y ait eu une période de temps géologique vraiment prolongée intercalée entre deux semblables mouvements. Mais il arrive également de rencontrer, sur les mêmes fractures, des superpositions de dislocations qui ont été considérées comme appartenant à des époques tout à fait distinctes, et tel paraît être le cas quand, ce qui arrive souvent, des sources thermales actuelles suivent des filons anciens. Il arrive notamment, dans ces filons redислоqués, qu'une nouvelle fracture, en rencontrant une plus ancienne, se dévie à l'intersection suivant la direction de la première.

Rappelons à ce propos ce que nous avons dit sur l'existence fréquente, à l'intérieur de filons concrétionnés, de druses encore ouvertes et parfois même de cavités assez grandes pour qu'un homme puisse y pénétrer (mine Churprinz à Freiberg, Mies en Bohême). Loin qu'un tel fait doive surprendre, on peut, au contraire, s'étonner qu'il ne se soit pas réalisé

¹ Voir pages 152 et 163.

plus généralement et que le dépôt des minerais sur les parois d'une fracture n'ait pas plus généralement formé des sortes de bouchons sur des points rétrécis, interrompant ainsi la continuation du dépôt au-dessus et au-dessous.

Certaines de ces géodes paraissent avoir été encore remplies tout récemment de leur eau métallisante, de sorte que les actions de métallisation ont pu continuer à s'y exercer jusqu'à nos jours.

Température de cristallisation. — Il serait extrêmement intéressant de savoir à quelle température ont cristallisé les remplissages filoniens (exclusion faite, bien entendu, des ségrégations ignées¹). Malgré la relation d'origine avec les roches ignées admise par nous, cette température ne doit pas avoir été bien élevée. Les fumerolles chlorurées, qui sont les plus chaudes, ont pu se dégager vers 500°; mais les fumerolles sulfurées ont dû avoir une température moyenne de 100 à 150°. Ce sont ces diverses fumerolles que nous supposons avoir minéralisé les eaux sous pression. En supposant à celles-ci, pour les gisements sulfurés, une température qui aurait peu dépassé 100° à 150°, nous sommes donc sans doute assez près de la vérité. Cette température correspondrait à celle normalement atteinte par les eaux vers 3 à 5 000 mètres de profondeur par le seul effet du degré géothermique. Elle a dû être souvent beaucoup plus basse, puisque nous trouvons des quartz filoniens dont les inclusions liquides se vaporisent à 27°. Les vraisemblances sont donc pour que bien des cristallisations filoniennes se soient effectuées dans les conditions moyennes de température de leur milieu rocheux enveloppant: ce qui leur a permis de se mettre en équilibre stable avec lui sans grande transformation ultérieure.

On en a une preuve, par exemple, pour le sulfure de zinc, qui est toujours à l'état de blende dans les filons, tandis que la forme obtenue par réaction calorifique est la wurtzite. La wurtzite n'est guère connue que dans quelques cas exceptionnels, comme à Oruro. Si elle avait commencé par se produire, une évolution intérieure l'aurait transformée en blende; mais, dans la plupart des cas, cette hypothèse n'est pas nécessaire.

3° — ÉTUDE DU REMPLISSAGE FILONIEU. GROUPEMENT DES MINÉRAIS. ENSEIGNEMENT FOURNI PAR L'ANALYSE SPECTROGRAPHIQUE DES BLENDES

Quand nous examinons un remplissage filonien avec l'idée de reconstituer le milieu primitif dont il provient et les conditions de cristallisation qui ont amené sa disposition actuelle, nous rencontrons divers champs d'étude. Nous pouvons d'abord (*a*) envisager chaque minéral du remplissage individuellement, afin de lui demander ce qu'il peut nous apprendre, soit par ses inclusions microscopiques, soit par les procédés d'analyses divers. Nous devons, en second lieu (*b*), examiner les associations de minéraux, que renferme un même remplissage: minéraux dont les uns ont pu simplement cristalliser côte à côte et successivement, tandis que les

¹ Voir plus loin, page 157, note 2, des observations sur les températures de cristallisation dans certaines roches.

autres se trouvent associés dans une même phase. En dernier lieu (c), l'ordre de succession observé nous renseignera sur les variations qui ont pu se produire, soit dans la composition de la dissolution, soit dans les conditions de précipitation. Nous allons successivement examiner ces trois points.

a) ÉTUDE DES MINÉRAUX INDIVIDUELS

L'étude individuelle des minéraux filoniens a d'abord pour résultat de nous montrer, par l'*examen microscopique*, quelque chose d'analogue à ce que nous révèle à l'œil nu l'ordre de succession des remplissages. Nous constatons ainsi que tel minéral englobe des parcelles de tel autre et s'est par suite précipité après lui : ce qui, dans chaque cas, implique des conditions de dépôt déterminées et en exclut d'autres. Le quartz peut englober des cristaux de rutile, de tourmaline, d'épidote, d'actinote, de trémolite, etc.

Nous observons, en outre, dans les minéraux des roches et des filons, des *inclusions* proprement dites. Pour celles-ci, nous rappelons seulement qu'on en connaît, d'une façon générale, de vitreuses, de liquides et de gazeuses. Les premières sont propres aux roches ignées. Les liquides sont parfois très abondantes dans certains quartz de pegmatites ou de filons stannifères. On en retrouve dans des émeraudes, zircons, grenats, péridots, etc. Elles sont souvent constituées par de l'acide carbonique liquide (topaze du Brésil), conformément à une observation précédente sur le rôle de ce corps dans la minéralisation filonienne, parfois aussi par un liquide hydrocarboné qui donne une odeur fétide sous le marteau, plus souvent par de l'eau avec du chlorure de sodium, du fluorure de calcium ou des fluorures alcalins (quartz de pegmatite, topaze, etc.); parfois enfin il existe des traces de sulfate de baryte¹.

Des inclusions gazeuses peuvent, quand la pression est très faible, contenir de l'azote avec des traces d'oxygène et d'acide carbonique, ou, quand la pression est supérieure à la pression atmosphérique, ce qui a dû se présenter le plus souvent dans nos filons, de l'hydrogène, des carbures d'hydrogène et de l'acide carbonique. A l'égard des premières, comme en ce qui concerne certaines inclusions liquides, il ne faut pas oublier que les inclusions liquides peuvent s'être développées après coup par l'altération d'un cristal. En résumé, pour les minéraux filoniens, on est ramené par là à l'idée que les quartz filoniens et minéraux connexes du groupe granulitique se sont formés dans un milieu à fumerolles hydrocarbonées, avec chlorure de sodium, à une température qui ne devait pas dépasser 300°².

Au lieu de l'examen microscopique, on peut encore recourir à l'*analyse*, avec les procédés spéciaux dont on dispose aujourd'hui, notamment avec l'aide du spectroscope³. On retrouve ainsi, par l'examen d'un minéral indi-

¹ LACROIX. *Minéralogie de la France*, t. 3, p. 38.

² SORBY a cru pouvoir ainsi évaluer à 351° la température de cristallisation d'un quartz de trachyte. D'autres mesures ont donné 307° et 87 atmosphères pour le quartz de diorites quartzifères bretonnes.

³ De telles analyses ayant ici pour but de contrôler le milieu constituant d'un minéral, il n'est pas nécessaire d'isoler celui-ci sur le soin minutieux que l'on devrait

viduel, des conclusions analogues à celles que nous pourrions tirer plus tard de l'étude des associations minéralogiques : l'analyse faisant ressortir la présence, à l'état microscopique, de métaux étrangers que l'on n'aurait pas songé à supposer dans ce cas, mais que l'on voit ailleurs associés au même minerai en cristaux volumineux. Chaque élément cristallin reproduit, en petit, le milieu complexe où il s'est formé. Ayant eu l'occasion de faire en collaboration avec G. Urbain, une étude de ce genre pour les blendes¹, j'insisterai un peu sur l'enseignement que l'on en peut tirer en ce qui concerne le milieu originel, l'influence des traces sur la cristallisation et, d'une manière générale, la démonstration de notre théorie métallogénique.

Les blendes ainsi analysées sont loin de présenter seulement les composants théoriques qu'on leur attribue d'ordinaire, et la nature des métaux y varie, comme le groupement et la structure des cristaux de blende eux-mêmes. Les influences diverses, qui ont pu agir sur ces caractères variables d'un même sulfure métallique et que l'on pouvait prévoir avant tout examen, sont les suivantes :

1° Il est évident que la composition primitive du milieu de cristallisation est le facteur fondamental. Suivant les points et suivant les gisements, tels ou tels métaux ont pu intervenir, en proportion elle-même variable. La présence de ces métaux doit être, elle aussi, liée, tant à la composition locale du bain de fusion dont ils émanent qu'à la nature et à la température des fumerolles, par lesquelles ces métaux ont dû surtout acquérir leur mobilité.

Dans la théorie que nous développons ici, on est en droit de se demander si la profondeur de cristallisation dans l'écorce terrestre, entraînant une proximité plus ou moins grande du magma igné primitif, et, sans doute, une température différente des fumerolles, ne se traduirait pas, même dans le cas d'un minerai déterminé comme la blende, par la composition des minerais propres à un ensemble de provinces métallogéniques ayant dû correspondre à des profondeurs de cristallisation diverses.

2° Une solution de divers sels métalliques étant donnée, les conditions, dans lesquelles s'est opérée la cristallisation, ont dû avoir aussi leur influence : lenteur de formation et pureté des cristaux, ou cristallisation rapide et confuse ; rapprochement des parois ; cristallisation par zones régulièrement concrétionnées, ou cristallisation en masse, etc.

3° Nous avons déjà remarqué que les minerais, une fois formés, ne sont pas restés, depuis le moment de leur dépôt primitif, tels qu'ils s'étaient constitués. On peut d'abord envisager, au moins théoriquement, la possibilité de formations autonomes, produites par une évolution chimique des métaux, analogue à celle que l'on constate pour les corps franchement radio-actifs et mise en évidence par les périodes de temps colossales dont nous nous trouvons observer l'effet. On constate, d'autre

apporter si l'on voulait faire une étude de minéralogie proprement dite, et il est, au contraire, intéressant de pouvoir multiplier beaucoup les investigations rapides sur des échantillons recueillis dans diverses parties d'un même gisement ou dans des gisements comparables.

¹ L. DE LAUNAY et G. URBAIN. *Recherches sur la métallogénie des blendes et des minéraux qui en dérivent* (C. R., 4 juill. 1910; B. S. G. F. 4 déc. 1910).

part, sans aucune hypothèse, l'effet capital de modifications ultérieures dues à l'action du milieu : actions ayant atteint à toute époque géologique leur paroxysme dans le voisinage de ce qui était alors la superficie, au-dessus de ce qui était alors le niveau hydrostatique, mais ayant pu se prolonger au-dessous de ce niveau par des actions plus lentes, plus profondes, d'un caractère différent parce que moins oxydantes, auxquelles nous avons déjà fait allusion et dont l'étude n'a guère été abordée jusqu'ici. Ces altérations peuvent se traduire, aussi bien par l'élimination de certains éléments devenus solubles et par leur concentration un peu plus loin, que par l'apport, l'introduction de substances nouvelles, empruntées aux terrains encaissants ou voisins.

Voici, sur ces divers points, les résultats que nous avons obtenus en examinant en un grand nombre d'échantillons.

I. — Composition du milieu primitif. Influence de la profondeur de cristallisation. — Diverses blends ont été choisies comme appartenant à des gisements caractéristiques de types métallogéniques différents, paraissant correspondre notamment à des profondeurs de cristallisation diverses et à des rapports plus ou moins intimes avec les roches ignées, afin de rechercher si les métaux associés au zinc étaient en relation avec cette profondeur originelle. Nous avons ainsi étudié les types suivants :

α) Imprégnations sulfurées liées à la recristallisation par retour en profondeur qui a produit la « gneissification » ; filons-couches intercalés dans les terrains à aspect archéen, témoignant : 1° d'une cristallisation primitive particulièrement profonde, en rapport relativement direct avec des magmas granitisants, et 2° (ce dont nous aurons à nous souvenir dans un autre paragraphe) particulièrement ancienne.

Exemples : Ammeberg (Suède) ; Rävåla (Suède) ; Pitkäranta (Finlande) ; Sterzing (Tyrol) ; Saint-Christophe, près Breitenbrunn (Saxe) : ce dernier plus discutable.

β) Filons de la chaîne hercynienne, d'âge probablement voisin du carbonifère et correspondant à une profondeur de cristallisation moyenne.

Exemples : Vieille Montagne (Belgique) ; Andreasberg (Harz).

γ) Filons tertiaires, à cristallisation récente et peu profonde ; types divers d'Algérie, du Mexique, etc.

Dans l'ordre d'idées qui nous occupe en ce moment, nous considérons comme fort intéressante l'apparition presque constante de l'étain dans le premier groupe et du mercure dans le troisième : la réciproque n'étant vraie que très exceptionnellement.

Notons également la présence simultanée du bismuth avec l'étain à Rävåla et l'apparition fréquente d'un peu de cuivre à Sterzing, Pitkäranta et Ammeberg. Le groupement minéralogique de l'étain, du bismuth et du cuivre est, comme nous le verrons, très fréquent dans des gisements où l'un ou l'autre de ces métaux domine, sans qu'il soit question du zinc ; il est curieux de le voir apparaître ici dans ces blends de profondeur, qui, géologiquement, semblent avoir cristallisé sous l'influence très proche des magmas granulitiques auxquels est due la gneissification. Les fumerolles stanno-cuprifères, liées à ces granulites, font ici leur apparition à titre subordonné.

Pourquoi le groupement stannifère vient-il dans ces gisements profonds, s'associer au zinc, d'autres observations le laissent peut-être soupçonner. Ainsi certaines blendes pyrénéennes, que nous assimilons au second groupe malgré leur âge sans doute tertiaire (Suelza, etc.), présentent également des traces d'étain, en même temps que du germanium en quantités relativement sensibles et un peu de gallium. Ces deux derniers corps, germanium et gallium, se retrouvent dans la blende pyrénéenne de Pierrefitte, où il y a association de magnétite. On sait également depuis longtemps que quelques blendes de Freiberg en Saxe renferment des microlithes de cassitérite. Dans ces divers cas, il semble que la relation d'origine des sulfures avec les roches mères dérivées des granites ne soit pas très lointaine et que cette proximité soit intervenue.

Enfin, le gisement tertiaire de Pulacayo, en Bolivie, étudié plus loin, est caractérisé par la tétraédrite et la chalcopyrite argentifère avec blende, pyrite, galène, stibine et proportions notables d'étain et de bismuth. On voit très bien, par nos analyses, l'étain entraîner le bismuth et le cuivre le molybdène.

En opposition avec les blendes anciennes liées à des magmas profonds, les blendes tertiaires d'Algérie ne renferment pas d'étain ni de bismuth. On y trouve, au contraire, les seules traces de mercure constatées dans toute la série des analyses : à Gharbou, à Sakamody et à Gerrouma ¹. L'antimoine, que nous n'avons pas rencontré une fois dans le groupe Ammeberg, est fréquent ici. L'examen des blendes seules confirme donc ce que nous montrera l'étude des provinces métallogéniques. De même que, dans la province algérienne, nous aurons côte à côte et passant de l'un à l'autre des filons de zinc, antimoine et mercure, ce même rapprochement se retrouve dans la cristallisation des filons individuels. La présence du mercure, que nous avons déjà signalé comme le métal de dépôt superficiel par excellence, est particulièrement typique de ces filons, qualifiés en commençant de superficiels et de récents.

Tous ces faits, dont il ne faudrait cependant pas exagérer la rigueur, sont conformes à l'idée qu'il existe, pour les minéralisations effectuées à une époque déterminée dans une région déterminée, un certain milieu métallique profond, caractéristique de cette région et de cette profondeur de cristallisation : milieu dont les éléments ont pu, sous des influences diverses que nous essayerons de démêler, se disperser entre divers filons ou diverses parties d'un même filon, mais qui se traduit, en chaque point, au moins par des traces de ces substances. Les filons d'une même province métallogénique se montrent ainsi, quel que soit leur minerai dominant, liés les uns aux autres par un rapport de constitution tout à fait intime.

Nous signalerons encore, dans le groupe algérien, la présence de quelques minerais particulièrement riches en germanium, tels que Gerrouma et Sakamody, Ain Chaouch et le Djebel Reças. Les blendes tertiaires de Pierrefitte dans les Pyrénées sont également riches en germanium comme en gallium. Le gallium se développe aux Picos de Europa et nous avons

¹ Le mercure, accompagné de gallium, a été antérieurement signalé dans les blendes tertiaires de Picos de Europa (Asturies).

retrouvé une proportion sensible de germanium avec du gallium dans la blende tertiaire du Suelza (Pyrénées espagnoles). Dans le groupe ancien d'Ammeberg, ce germanium, sans faire absolument défaut, paraît beaucoup plus rare : mais on trouve, par contre, de l'indium.

II. Influence des conditions de cristallisation. — Il est résulté nettement de nos observations que les cristallisations lentes et les cristallisations confuses se différencient par la nature des métaux secondaires entraînés. Le cadmium va dans les beaux cristaux de blende pure, l'indium dans les mélanges confus à grain fin qui caractérisent les résidus de cristallisation. C'est peut-être la raison pour laquelle nous venons de signaler plus haut l'abondance de l'indium dans le groupe Ammeberg, qui correspond généralement à une cristallisation confuse dans des interstices minces, tandis que, dans la cristallisation concrétionnée par larges zones ayant eu le temps de se séparer les unes des autres, comme cela se produit pour les filons tertiaires relativement superficiels — surtout quand ces filons ont pu être l'objet d'une remise en mouvement — l'indium a été généralement éliminé. Nous verrons plus loin que cet indium a pu partir avec les produits d'altération.

III. Possibilité d'une évolution ultérieure. Altérations. Éliminations et apports. — En ce qui concerne l'idée d'une transmutation spontanée analogue à celles des substances radioactives, je me contente de dire ici que les résultats de nos analyses ont été négatifs¹. Mais, pendant les milliers d'années qui se sont écoulés depuis qu'une de nos blends, même les plus récentes des filons tertiaires, a cristallisé, on peut admettre en principe que ce minerai a été sans cesse en présence de l'eau. Il en est résulté des remises en mouvement d'ordre purement chimique que nous étudierons et des épurations par recristallisation très caractéristiques.

Nous avons pu constater, sur certaines calamines considérées par nous comme un produit d'altération des blends, une épuration, prévue sans doute, mais poussée encore plus loin qu'on n'aurait pu le penser. La calamine tout à fait blanche du Djebel Reças (Algérie) ne contient plus aucune trace d'un autre métal, si ce n'est un peu de plomb. Ailleurs, comme dans la calamine d'Ouarsenis, il s'est produit la même épuration, mais sans déplacement, dans une atmosphère peroxydante qui a provoqué la précipitation du fer avec le zinc et, par suite, l'existence d'une calamine rouge, à opposer, comme on a tant d'occasions de le constater, aux calamines blanches.

Beaucoup d'autres calamines sont moins pures. On observe notamment fréquemment un accroissement de la teneur en indium dans les produits altérés; cet indium, quand le fer a été éliminé, s'élimine avec lui. La présence d'un peu de cuivre, de plomb ou d'argent est toute naturelle dans les altérations de minerais sulfurés qui contiennent déjà ces métaux; mais la présence du manganèse est plus intéressante à examiner. Nous verrons, en effet, le problème posé par tant de gisements sulfurés qui, dans la zone d'altération superficielle, se sont transformés en oxydes de fer manganésifères, ou même en oxydes de manganèse, tandis que, dans

¹ Voir plus loin page 173.

le magma sulfuré profond, origine de ces altérations superficielles, le manganèse est en quantité trop faible pour avoir attiré l'attention des chimistes. Nos analyses font constater la fréquence du manganèse dans les calamines, qui sont un produit d'altération. On n'en trouve jamais dans des blendes autres que celles du terrain cristallophylien.

Enfin, dans les altérations, il n'y a pas seulement élimination, mais aussi apport d'éléments empruntés aux terrains encaissants. Les plus caractéristiques de ces emprunts, comme le phosphore des affleurements plombifères, n'apparaissent pas avec la méthode d'investigation employée; mais on constate, dans un cas typique, le développement du titane pris à l'argile dans la moresnetite de la Vieille Montagne, et, en même temps, celui du vanadium, que nous sommes habitués en métallogénie à voir apparaître avec le phosphore. Il est possible également qu'une partie du manganèse superficiel vienne de là.

b) ASSOCIATIONS MINÉRALOGIQUES.

Nous attacherons, dans tout cet ouvrage, une grande importance à mettre en relief les associations de minéraux qui existent dans un même remplissage filonien. Même lorsqu'il est vraisemblable que ces minéraux ne se sont pas déposés exactement ensemble, on est du moins conduit à admettre qu'ils proviennent de la même réserve profonde, d'où ils ont pu sortir, en proportions variables, suivant les moments. Cette partie de notre sujet sera spécialement mise en lumière dans chaque chapitre de détail, en sorte qu'il est inutile de la résumer ici. Je citerai seulement quelques groupements particulièrement typiques.

C'est d'abord celui des minéraux stannifères ou des minéraux de pegmatite, si remarquable par la façon dont le chlore, le fluor ou le bore y décèlent partout leur présence : quartz, émeraude, topaze, tourmaline, cryolite, fluorine, apatite, amblygonite, wawellite, etc., avec minerais d'étain, tungstène, molybdène, bismuth et or.

C'est ensuite le groupement tout à fait caractéristique des trois sulfures métalliques : blende, galène, pyrite, que nous réunirons communément sous le nom de BGP, en y joignant parfois la chalcopyrite, BGPC.

C'est enfin le type mercuriel, simplement associé à de la silice, de la pyrite et des hydrocarbures.

c) SUCCESSION DES REMPLISSAGES.

Comme nous l'avons dit, on voit le remplissage d'un filon se modifier, soit qu'on l'examine transversalement en allant d'une éponte à l'autre, soit qu'on le suive en direction. Il en est de même suivant l'inclinaison, qui est, à cet égard, assimilable à la direction. Cherchons la raison possible et les lois probables de ces phénomènes.

Pourquoi d'abord le remplissage se compose-t-il de zones successives formées de minerais alternants? Il faut reconnaître que, jusqu'ici, nous constatons le fait sans l'expliquer avec précision. Une théorie ancienne en donnait, il est vrai, une interprétation très simple en supposant une succession de venues métallifères complètement indépendantes l'une de

l'autre et s'étant succédé par hasard au même point. On poussait même alors l'idée très loin. On admettait que la durée d'un remplissage filonien avait pu s'étendre sur plusieurs périodes géologiques, avec modification complète dans l'intervalle des conditions de minéralisation, et on était amené à en conclure que le système de minéralisation était caractéristique d'une époque donnée. Il était alors assez naturel de supposer que, s'il y avait eu ouverture de filons différents, chaque groupe de filons parallèles correspondait à une certaine période, marquée en même temps par un certain remplissage. Cette dernière idée, dans laquelle il peut y avoir une part d'exactitude si on considère une région limitée, a conduit à de grandes erreurs pratiques lorsqu'on a voulu l'étendre, par une application malheureuse du réseau pentagonal, à un pays ou à un continent tout entier.

On peut, à ce propos, remarquer la lenteur avec laquelle s'opèrent les consolidations de roches profondes. Tout indice d'éruption peut avoir disparu à la surface, et les roches ignées qui y sont montées ont pu depuis longtemps se consolider et se craqueler quand émanent encore, des parties internes restées chaudes, des eaux qui viennent déposer leurs produits dans ces fissures. Pendant ce long intervalle de temps, la composition profonde du magma métallisant a pu changer, les minerais d'un second remplissage peuvent être très différents de ceux du premier et paraître même appartenir à une période géologique très différente. Ils font, en réalité, partie de la même période.

L'ordre des minéraux déposés dans un filon obéit-il à une loi générale ?

Cela semblerait logique s'il y avait eu précipitation d'une même liqueur dans des conditions progressivement modifiées, sauf à imaginer des récurrences pour un apport nouveau de la profondeur. Quelquefois, en effet, on a cru apercevoir une succession théorique : par exemple dans certains filons de Freiberg, l'ordre blende, galène, pyrite que nous traduirons en abrégé dans cet ouvrage, par la formule BGP. Je donnerai également, à propos de l'étain, des successions de minéraux, signalées comme habituelles en Saxe : 1° molybdénite et mica lithinifère ; 2° quartz et topaze ; 3° cassitérite et wolfram ; 4° mispickel ; 5° apatite, fluorine, sidérose et blende. Mais, bien souvent, le nombre des répétitions est tel et leur ordre est si variable qu'on désespère d'arriver à une loi. Je prends par exemple, presque au hasard, le filon reproduit plus haut, figure 11 ; on y observe de gauche à droite en désignant les minerais par leurs initiales (B. blende ; G. galène ; P. Pyrite ; Cp. Chalcopyrite ; C. calcite) et en supprimant quelques filets discontinus : B — G — P — G — C — G — B — Cp — C — Cp — C — Cp — C — Cp — C — Cp — B — Cp — B — Cp — C — B — Cp — C — Cp — C — B — Cp — B — C — B — C — B — C — B — C — B — Cp — C — B ; soit, au minimum, 40 alternances, comprenant 12 zones de blende, 3 de galène, 1 de pyrite, 11 de chalcopyrite, et 13 de calcite.

Ce n'est pas là un cas exceptionnel et les filons très bien rubanés du Suelza présentent autant d'alternances de blende et calcite dominantes, avec de la pyrite, de la galène et du quartz. Une coupe, prise au hasard, y donnera par exemple : oligiste presque compact, 1,50 m. ; calcite pauvre en blende, 0,60 m. ; calcite riche en blende, 0,30 m. ; calcaire lamelleux, 0,35 m. ; calcite avec un dixième de galène, 0,30 m. ; calcite avec blende et galène, 0,60 m. ; calcite pauvre, 1 mètre ; veine riche large de 1,25 m.

régulièrement zonée de calcite, quartz et blende, avec un peu de galène, et, au centre, une veine pyriteuse de 5 à 6 cm. ; calcite et blende, contenant un sixième de blende, 1 m.

4° — VARIATIONS EN DIRECTION ET EN PROFONDEUR

Si l'on suit la longueur d'un filon, on assiste sans cesse à sa transformation. Par exemple dans le groupe des BGP, on aura, suivant les zones, prédominance du zinc, du plomb, du fer, ou même ailleurs du cuivre. Autrefois, on a cru reconnaître, dans certains gisements, une relation entre ce changement et celui de la roche encaissante. Mais là encore la suite des observations n'a nullement confirmé les lois fondées sur des observations sommaires. Ailleurs les changements de minéralisation sont identiques sans que la roche encaissante ait varié.

Les différences que pouvaient présenter, aux divers points de la longueur d'un filon, les conditions du milieu extérieur (y compris l'allure topographique) ou celles du magma interne, nous sont trop inconnues pour qu'il soit possible de raisonner fructueusement à cet égard.

Il n'en est pas tout à fait de même pour les variations en profondeur où, tout en ignorant la profondeur absolue d'un point considéré au-dessous de ce qui était la superficie au moment de la cristallisation première, nous connaissons du moins sa profondeur relative par rapport aux autres points supérieurs ou inférieurs du même filon : ce qui nous permet de tenter des comparaisons. La difficulté est ici, comme nous le remarquerons avec insistance dans un autre chapitre, que l'état de choses constaté dans un filon actuel est la résultante d'une longue évolution, où certaines influences très récentes se sont superposées aux effets anciens avec une valeur prépondérante. C'est même une sorte de fiction que d'envisager, comme nous le faisons, un gisement de formation primaire, bien distinct des altérations secondaires, puisque ces altérations ont dû commencer dès le dépôt et se continuer presque sans interruption. On peut néanmoins établir une coupure logique entre les réactions qui ont fait partie du phénomène primitif progressivement modifié, comme une éruption qui se ralentit et les réactions qui, très longtemps après, presque de nos jours, sont venues modifier un état antérieur, resté pendant l'intervalle, à peu près stable : réactions capitales, que nous réservons pour le chapitre XI.

Or, si on envisage l'ensemble des conditions primitives, on voit deux raisons pour que des variations aient pu se produire avec la profondeur : d'abord la distance première à la superficie, ayant pu entraîner des différences de température et de pression, et puis, comme nous l'avons déjà indiqué¹, les remontées de métaux provoquées par la continuation du phénomène hydrothermal interne dans des conditions nouvelles.

L'observation de ces variations primitives en profondeur présente une importance, sur laquelle il est inutile d'insister : la prévision de l'état profond d'après l'état superficiel étant à vrai dire le problème pratique fondamental de la géologie, la question capitale posée par les mineurs aux

¹ Page 146.

géologues. Théoriquement nous pouvons avoir là, d'autre part, le moyen de déterminer les conditions de dépôt d'après la manière dont ces conditions ont pu se trouver influencées par telle ou telle circonstance variable. Mais, si le problème est intéressant, il est d'une difficulté extrême.

Nous allons essayer de grouper quelques observations à ce sujet. Ce serait à notre avis, les déprécier que de vouloir trop les généraliser ou les préciser. On voit souvent des praticiens, qui ont passé à peu près toute leur vie dans un district déterminé, ou dans un petit nombre de mines, prétendre établir en règles d'une portée universelle les résultats incertains et locaux de leur expérience. Plus on élargit au contraire son champ d'études, plus on dispose d'observations nombreuses et diverses, plus, sur ce point comme sur beaucoup d'autres, on s'aperçoit que le problème posé est complexe et mal résolu. La principale difficulté est que la hauteur, sur laquelle nous observons les filons, est extrêmement restreinte par rapport aux dimensions terrestres, ou même à l'étendue possible des dislocations métallogéniques. J'ai essayé ailleurs de remédier à ce défaut en comparant des régions diverses ayant, d'après leur tectonique, des chances pour correspondre à différentes profondeurs originelles. Nous verrons quelques applications de cette méthode au chapitre xiv. Il semble bien en résulter, de la profondeur à la superficie, un certain ordre théorique de précipitation, qui, en gros, sera : Etain; — Cuivre; — Zinc; — Plomb; — Mercure. Quand nous retrouverons tout à l'heure un ordre semblable dans certains cas particuliers, nous serons plus tenté de lui attribuer une valeur.

Ces réserves faites, voici quelques observations, toutes d'une interprétation discutable, sur ce sujet si intéressant.

Nous citerons, par exemple, plus tard le fait devenu classique que, dans la mine de Dolcoath, en Cornwall, on a exploité du cuivre jusqu'à 270 m. de profondeur; puis, de 270 à 300 m., du cuivre et de l'étain; puis au-dessous de 300 m., de l'étain. Le fait présente une apparence de rigueur, comme si les chlorures d'étain n'avaient pas pu dépasser un certain niveau théorique, tandis que les sulfures de cuivre associés seraient montés plus haut. Mais, en réalité, comme nous le dirons, son explication reste douteuse. Certains géologues ont remarqué que, dans une partie au moins du filon, le changement s'était produit quand le filon a passé des schistes dans le granite. Ce qui conduirait à dire que la distance au granite a été la cause déterminante. Par contre, le fait que la transformation s'opère suivant une ligne de niveau parallèle à la superficie actuelle, bien que cette ligne de niveau soit traversée très obliquement par la limite des schistes et du granite, amène à se demander si la concentration du cuivre dans les parties hautes ne serait pas due à un de ces effets de cémentation étudiés plus tard. Ailleurs, au Cornwall, à Old Hewas, on a eu alternance du cuivre et de l'étain.

Dans le cas des filons sulfurés, on observe souvent, pour une cause ou pour une autre, des variations que nous examinerons surtout à propos des remises en mouvement, mais que nous devons cependant signaler ici, comme pouvant être attribuables à des eaux filoniennes ascendantes.

Un cas très net est, par exemple, celui du cinabre, qui semble avoir

émigré de la profondeur (s'il s'y est jamais déposé) pour monter peu à peu vers la superficie actuelle, au voisinage de laquelle il paraît aujourd'hui concentré. D'où le caractère de métal mobile et superficiel que nous lui avons attribué.

On a remarqué presque partout au Mexique que les gisements de mercure diminuaient rapidement en profondeur et que le cinabre, dans les gisements plombo-argentifères, se rencontrait uniquement dans les parties hautes, où il enveloppe les minéraux d'argent et de plomb (San Juan de la Chica; Pozos dans Guanajuato; Prepognes près Taxco (Guerrero).

Des faits du même genre ont pu contribuer à provoquer la concentration du cuivre que l'on observe parfois aux affleurements de filons plombifères, la diminution de teneur en cuivre que nous avons déjà signalée dans la profondeur¹ des amas pyriteux et surtout la production des zones de cémentation ou de bonanza si typiques pour le cuivre ou l'argent, dont nous donnerons une description détaillée.

Nous avons vu également comment les sulfures de plomb et de zinc avaient dû se précipiter dès le dégagement de l'hydrogène sulfuré en excès pour rester ensuite à peu près stables, tandis que les sulfures d'argent et de cuivre, déposés d'abord avec eux, avaient pu être remontés à l'état de combinaisons antimonieuses donnant ainsi une zone de cuivres gris et argents rouges, dite de cémentation.

Par un phénomène du même genre, dont nous chercherons la cause au chapitre de l'argent, ce métal disparaît constamment au delà d'une zone de bonanza, où il a atteint sa teneur maxima.

Enfin, ce que nous aurons à dire au paragraphe suivant sur la disparition en profondeur des remplissages filoniens se rapporte directement au sujet étudié ici.

5° — LIMITATION VERTICALE DES REMPLISSAGES FILONIENS

Mécaniquement il est évident qu'un filon ne peut se continuer très loin en profondeur. Il est nécessairement limité comme l'effort dont il résulte, et même les grandes fractures tectoniques, dont les dimensions verticales sont suffisantes pour paraître indéfinies à nos petits travaux miniers, doivent être restreintes à un très petit nombre de kilomètres. Nous avons déjà dit un mot de cette question². A une certaine profondeur, dans un mouvement tectonique quelconque, il ne doit plus se produire de fracture parce que le déplacement tangentiel et radial, [dont résultent en définitive ces fractures, est un phénomène superficiel, et, parce qu'à une profondeur suffisante, si une fracture continuait encore à se produire, elle serait aussitôt fermée par la pression, combinée avec la plasticité plus grande des roches. D'après une théorie (contestable, il est vrai, de Van Hise), 10 km. seraient, à cet égard, un maximum. A la forme filonienne, nous avons déjà dit qu'il devait, en profondeur, succéder une autre forme, résultant d'une pénétration sous pression dans les interstices des terrains : ce que nous avons appelé une imprégnation diffuse.

¹ Page 401.

² Pages 109 et 111.

Vers le haut également il est vraisemblable que toutes les fractures filoniennes n'ont pas dû, au début, monter jusqu'à la surface. Nous en avons toutefois peu de preuves directes parce que les chances de rencontrer un filon qui n'aurait pas d'affleurement sont forcément très rares.

En dehors de cette limitation mécanique, nous avons beaucoup de raisons pour admettre également une limitation d'ordre chimique. Quand même la fracture aurait existé indéfinie, elle n'aurait pu s'incruster d'un remplissage déterminé que sur une hauteur limitée, où les conditions nécessaires à la précipitation et à la persistance des précipités se sont trouvées réalisées. C'est, sous une autre forme, la conséquence de ce que nous avons dit sur les variations théoriques en profondeur.

Un fait d'observation directe montre que la formation de gîtes métallifères n'est pas actuellement réalisée à la surface de la Terre. Mais on aurait pu se demander s'il n'en a pas été autrement dans les périodes d'intensité volcanique tellement plus considérable, où s'ouvraient des fractures de plusieurs kilomètres de long avec des largeurs de cent mètres et plus, où s'épanchaient des laves couvrant des pays entiers, etc. Diverses considérations amènent à penser que, même alors, les filons ont été limités dans le sens du jour et que l'érosion seule les y a fait ultérieurement apparaître.

On a fait, par exemple, au Mexique, cette observation intéressante que des gisements en rapport avec des andésites tertiaires présentant, d'une part des intrusions, de l'autre des effusions, se reliaient uniquement au premier type de roche, et ne pénétraient jamais dans la zone effusive plus superficielle. Villarello a cité comme exemples les gîtes auro-argentifères du Mineral del Oro dans l'État de Mexico et ceux de même caractère de Santiago dans l'État de Michoacan¹.

Et peut-être ces immenses crevasses métallisées, dont le Comstock est le type, offraient, au moment où elles se sont incrustées en profondeur, des gouffres béants à la superficie, obstrués en haut tout au moins par les éboulis, à travers lesquels les eaux démétallisées, mais encore chargées de silice, acide carbonique, etc. se dispersaient en un champ geyzerien, comme ceux du Yellowstone Park ou de l'Islande.

Pratiquement, nous avons peut-être moins d'occasions qu'on ne le croirait d'abord de constater cette limitation théorique en profondeur: limitation qu'il ne faut pas confondre avec la terminaison toute accidentelle d'une fissure coincée, mais communiquant, d'une façon quelconque, plus profondément, avec une autre fracture. Il faut, en effet, se rappeler que nos travaux miniers n'atteignent nulle part 2000 m. et que la limitation dont nous parlons ici correspond sans doute à plusieurs kilomètres de haut. Néanmoins, si nous rencontrons une zone métallisée dans des conditions d'érosion telles que toute sa partie haute ait été enlevée et que le fond d'une certaine minéralisation, ou même de toute minéralisation, soit proche, nous pourrions, dans tout un district, observer la même disparition d'un remplissage utile, à une profondeur toujours à peu près semblable. C'est peut-être l'interprétation qu'il faut donner à ce que disent les mineurs espagnols de la région Pennarroya-Linares sur la terminaison de tous leurs filons plombifères vers 300 à 400 m.

¹ (Cong. Mexico, 536).

CHAPITRE IX

TRANSFORMATION ULTÉRIÈURE DES GITES MÉTALLIFÈRES OBSERVATIONS GÉNÉRALES. — I. RÉACTIONS DE PROFONDEUR

1^o ÉVOLUTION SPONTANÉE ET RADIOACTIVITÉ. — 2^o DÉPLACEMENTS RELATIFS PAR RETOUR EN PROFONDEUR ET RAMENÉE AU JOUR. — RÔLE DES ÉROSIONS. — EAUX THERMALES ASCENDANTES. — MÉTAMORPHISME IGNÉ.

OBSERVATIONS GÉNÉRALES

Ayant terminé l'étude des gisements de formation primaire, c'est-à-dire des gisements restés dans les conditions primitives de leur formation, nous devons maintenant envisager les modifications sur place ou par transport que les éléments de ces gisements ont très souvent subies, au moins dans certaines de leurs parties et dont il est résulté des gisements que nous qualifions de formations secondaires. Ces réactions nouvelles, souvent très différentes des premières, les ont continuées dans bien des cas, après un intervalle plus ou moins long, en opérant sur de premiers produits de concentration métallifère dans le sens d'une concentration nouvelle; mais elles ont pu aussi agir par diffusion, par voie de dissolutions et de transports, qui ont détruit une concentration préexistante sans réussir toujours à en créer une autre ailleurs. Le gisement primitif a été ainsi, soit enrichi, soit appauvri, mais presque toujours fortement modifié.

Dans une période antérieure de la science, on a souvent eu une tendance fâcheuse, dont nos théories gardent trop de traces inconscientes, à s'imaginer, ou paraître s'imaginer, que les effets des phénomènes géologiques anciens se présentent à nous sans modification, tels qu'ils étaient au moment où ils se sont produits. *Mécaniquement*, on oubliait ainsi les deux cas, si essentiels en métallogénie, du retour en profondeur et de la ramenée à la superficie par dynamisme ou par érosion, dont le rôle a déjà été signalé. *Chimiquement*, on réduisait à fort peu de chose les modifications intimes subies par les roches, les sédiments et les minerais après leur cristallisation ou leur dépôt. On limitait alors à peu près les altérations superficielles au chapeau de fer des filons et à quelques productions de minéraux accidentels, localisés à 10 ou 20 m. de la surface. Pour le reste, on ne pensait même pas à une modification ultérieure possible d'aucun genre et tout ce qu'on observait de variations dans la profondeur d'un filon était réputé tenir à des changements primitifs dans la pression à mesure que l'eau métallisante se rapprochait du jour, ou à des

successions de venues métallifères indépendantes les unes des autres et échelonnées sur toute la série des périodes géologiques. C'est dans cet ordre d'idées qu'ont été faites toutes les études de filons en Saxe depuis Werner ; et c'est la théorie de la pression qu'on trouve encore uniquement dans le traité de Lapparent. On oubliait en particulier ce qui, pour moi, est un fait absolument fondamental en géologie, c'est que la surface actuelle n'a aucun rapport avec celle qui existait au moment où les filons se sont en général incrustés ; c'est qu'il a disparu plusieurs milliers de mètres superposés et qu'une variation de quelques mètres ou dizaines de mètres dans la profondeur sous une colonne d'eau de 2 ou 3.000 m. n'a pu avoir, sauf dans des cas particuliers, qu'une faible influence. Au lieu de supposer ainsi les gites métallifères et les roches cristallisées immuables, je croirais, au contraire, volontiers que, si on voulait pousser les choses à l'extrême, on ne trouverait peut-être pas un gisement métallifère, si récent soit-il (à plus forte raison lorsque son âge est ancien), resté identique à ce qu'il était au moment de sa formation. Nous serons par là conduits à négliger les cas où ces modifications sont faibles pour nous borner à ceux où elles prennent un rôle prépondérant.

Dès que l'on examine les choses d'un peu près, on s'aperçoit que rien dans la nature ne saurait rester longtemps invariable et immuable. La transformation, le déplacement sont la loi universelle¹. Aucun élément matériel situé dans la Terre ou à la surface de la Terre ne demeure inerte. Chacun d'eux est soumis à une modification constante qui l'amène, par des cycles plus ou moins compliqués, dont nous ferons l'étude pour certains corps en particulier, fer, titane, etc., à des formes provisoirement plus stables que les autres : formes elles-mêmes destinées à subir d'autres transformations, soit par des réactions lentes dans les mêmes conditions de milieu, soit par des réactions promptes si le milieu se modifie.

L'ensemble des gisements une fois formés, les minerais isolés eux-mêmes continuent donc à subir une évolution spontanée ou déterminée, qui ressemble à une sorte de vie. Les réactions calorifiques ou aqueuses, les métamorphismes, les dissolutions et les érosions, sans parler même des forces internes, tendent successivement à modifier les groupements des éléments entre eux, la position qu'occupent ces éléments dans l'espace et les formes de leur cristallisation. Ce genre de réactions a dû commencer dès le début et ne s'arrête pas ; il se produit encore presque sous nos yeux, et ce sont même, comme nous allons le voir, ses manifestations les plus récentes qui sont souvent les plus caractéristiques.

Plus, en effet, les conditions du milieu sont hétérogènes et variables avec les moments, comme cela se produit au voisinage de la surface, plus les transformations et les déplacements ont des chances pour être faciles. Seul peut-être le milieu interne très homogène se soustrait relativement à ces influences. Mais, dans les parties hautes des gisements qu'abordent nos travaux, celles-ci sont constamment agissantes et il en résulte souvent un rapport apparent entre la topographie actuelle et la distribution des minerais dans les filons : rapport qui serait inexplicable

¹ Voir un paragraphe précédent sur la *Chimie du Temps*, page 37.

si les gisements subsistaient intacts depuis l'époque lointaine où ils se sont constitués au-dessous d'une superficie qui était alors totalement différente de la superficie actuelle.

Les effets de transformation secondaire, que nous nous proposons d'examiner maintenant, appartiennent à deux catégories bien distinctes : 1° réactions de profondeur ayant pu se réaliser à une distance quelconque de la surface, que nous étudierons dans ce chapitre; 2° réactions liées au voisinage de la surface, soit dans une période ancienne, soit surtout dans la période récente, que nous réserverons pour le chapitre suivant.

Le premier groupe forme la suite naturelle des conditions de dépôts primaires antérieurement examinées et il n'existe à vrai dire qu'une démarcation un peu artificielle entre les déplacements immédiats par voie hydrothermale ascendante, dont nous avons déjà envisagé la possibilité aussitôt après le dépôt¹ et les mouvements du même genre, dont nous allons supposer l'intervention plus ou moins longtemps après. Nous y comprenons surtout des transformations sur place ou presque sur place, généralement dans l'intérieur du gisement même : par évolution spontanée; par métamorphisme igné; par eaux thermales ascendantes. Ce sont celles dont nous allons nous occuper. Dans le second groupe, il pourra y avoir également (chap. x) des réactions sans transport : métasomatose, latéritisation, peroxydation, cémentation, sécrétion latérale, etc.; mais on verra surtout intervenir des transports, soit simplement mécaniques et sans dissolution tels que les alluvions (chap. xi), soit avec dissolution et reprécipitation, tels que les gites d'évaporation saline, ou de précipitation chimique (chap. xii).

Quelques-unes de ces réactions ont pu se produire sans aucune participation des mouvements tectoniques. Mais, dans d'autres cas, ceux-ci ont dû puissamment intervenir, soit pour déplacer le gisement dans le sens vertical vers le bas ou vers le haut, soit pour provoquer des dislocations amenant à son contact de nouvelles eaux thermales, peut-être même de nouvelles eaux métallisantes, ou encore des roches ignées. Et, plus un gisement est ancien, plus il a de chances pour avoir été ainsi transformé.

Dans chacune des phases de l'histoire géologique qui se sont succédé depuis la constitution première du gîte, celui-ci a subi ainsi l'empreinte des mouvements tectoniques, auxquels a été soumis le massif dans lequel il se trouvait encastré, mouvements dont les effets principaux peuvent se ramener aux formes suivantes : retour en profondeur; ramennée au jour; plissement et dislocation. Chaque fois qu'il était ramené en profondeur, il pouvait subir un métamorphisme régional ou local, une poussée ignée ou hydrothermale. Chaque fois qu'il était remonté à la superficie, il était soumis à l'action des eaux de surface riches en principes chimiques et à l'érosion. On conçoit ainsi aussitôt que l'histoire d'un gisement un peu ancien puisse avoir été très compliquée : le massif encaissant ayant, par exemple, été tour à tour remonté et redescendu dans la profondeur, tandis que l'érosion tendait, d'autre part, à provoquer, sous une autre forme, le retour à la superficie. Il ne sera peut-être pas

¹ Page 146.

inutile d'insister aussitôt sur quelques conséquences de cette idée.

Par exemple, des retours à la superficie n'ont pu manquer de se produire à diverses époques de l'histoire géologique, puisqu'à chaque époque il a existé des continents, dont le sol était, comme le nôtre, formé de sédiments d'âges divers ramenés ensemble à la surface. Et, chaque fois qu'un tel retour à la superficie s'est produit, il en est résulté un ensemble de phénomènes analogues à ceux qui se produisent aujourd'hui à la surface de nos continents ou dans le fond de nos océans : phénomènes qui n'ont pu manquer d'exercer leur influence dans bien des termes de nos séries sédimentaires, où l'on ne sait pas toujours en reconnaître l'empreinte.

Quand nous touchons l'affleurement d'un filon cristallisé pendant le silurien ou le carbonifère, il est de toute évidence que cet affleurement n'a plus aucun rapport avec la superficie au moment où il a cristallisé. Mais que s'est-il passé dans l'intervalle, c'est ce que nous avons de la peine à concevoir.

Imaginons, pour fixer les idées, un filon qui se serait incrusté à l'époque carbonifère sur un massif hercynien, tel que celui de la Belgique et de la Prusse rhénane. Au moment où ce filon s'est incrusté à une profondeur que nous ne savons pas évaluer en mètres, la région où nous le voyons aujourd'hui était occupée par une chaîne plissée à manifestations éruptives. Cette chaîne, dont nous pouvons nous faire une idée en pensant, soit au Mexique, soit au Japon, se dressait probablement très haut au-dessus de la superficie actuelle et l'affleurement filonien que nous étudions était alors recouvert par des centaines, peut-être des milliers de mètres de terrains. Puis, par l'érosion, cette chaîne a dû se transformer approximativement en une pénéplaine, sur laquelle se sont exercées des actions d'altération continentale. Et, à un moment donné, ce compartiment a subi un affaissement suffisant pour permettre l'incursion de la mer cénomaniennne avec les profondeurs que laissent supposer, non seulement les épaisseurs actuelles des terrains crayeux, mais aussi les hauteurs d'eau sous lesquelles l'étude des phénomènes actuels montre que se constituent d'ordinaire de semblables craies. Nous croyons que, dans une première approximation, on peut envisager le niveau absolu des mers comme ayant été à peu près constant depuis cette époque jusqu'à la nôtre ; ce qui revient à attribuer les déplacements constatés par la stratigraphie dans le niveau des mers, non à un mouvement absolu des eaux, mais à un mouvement en sens inverse du sol. On peut donc admettre qu'un point, situé aujourd'hui à la cote 100 au-dessus de la mer, s'est trouvé au début du cénomaniennne au moins un millier de mètres plus bas.

Puis, après la période des sédimentations crétacées et tertiaires, qui a passé par des phases successives de relèvement et d'enfoncement, a eu lieu l'émerision définitive. Combien, à ce moment, la superficie était-elle plus haute qu'actuellement, on en a une indication approximative par l'épaisseur des terrains crétacés et tertiaires, qui devraient être représentés et qui font totalement ou partiellement défaut. Cette émerision a donc dû nécessiter un mouvement relatif de bas en haut ayant encore au moins un kilomètre d'amplitude. Après quoi, le rôle de ces mouvements tectoniques s'est restreint, sans pourtant cesser complètement, nous en

avons la preuve, et l'érosion récente a donné au sol son modelé actuel. Nous voyons donc qu'un point déterminé du filon — par exemple celui qui représente son affleurement — a certainement subi des dénivellations en haut et en bas dont l'amplitude se mesurerait en kilomètres, qu'il a été tour à tour éloigné de la superficie par les affaissements et le progrès des sédimentations, ou rapproché du jour par les érosions et le dynamisme et qu'il a dû nécessairement en résulter, pour ses minerais, des métamorphismes, des altérations diverses. Il suffit d'avoir la possibilité d'étudier un peu en détail, sur un horst bien caractérisé ou sur un bassin sédimentaire quelconque, comme je l'ai fait autrefois pour le massif de Saint-Saulge, ces mouvements successifs de l'écorce pour voir combien ils ont dû être compliqués et combien, dès lors, leur action sur les minerais n'a pu manquer d'être multiple.

Nous aurons à envisager toutes ces circonstances. Mais, heureusement pour la facilité de notre étude, entre les diverses phases de cette histoire compliquée, la dernière est, dans la plupart des cas, celle dont l'effet domine tout le reste. Sauf dans des circonstances relativement rares où les effets d'une action superficielle ancienne ont pu se trouver conservés jusqu'à nous par un enfouissement préservateur qui en a fait une sorte de Pompéi géologique, les derniers coups de rabot donnés par l'érosion ont eu pour résultat d'éliminer toutes les traces des réactions superficielles anciennes; et ce que nous voyons le plus souvent, c'est la partie profonde d'un gisement ancien, ramenée au voisinage de la surface par cette érosion, dont on ne saurait assez signaler l'importance capitale dans tous les phénomènes métallogéniques.

4° ÉVOLUTION SPONTANÉE ET RADIOACTIVITÉ

Nous ne mentionnons que pour mémoire cette catégorie de faits, dont nous avons déjà dit un mot dans un paragraphe précédent et au sujet de laquelle les observations précises manquent à peu près totalement. On peut cependant concevoir que, sans intervention chimique du milieu, des minéraux cristallisés, abandonnés à eux-mêmes, aient pu se transformer spontanément pour atteindre une forme d'équilibre plus stable. Nous savons qu'ils le font pour leur forme cristalline dans les exemples bien connus de dimorphisme moléculaire (soufre, boracite, sulfate et nitrate de potasse). Le groupement chimique a pu se modifier de même pour amener à son minimum la partie utilisable du travail de l'affinité. La mort apparente des cristaux peut n'être pas réelle. Et, en allant plus loin, on peut soupçonner, avec les réactions très prolongées de la nature, une évolution plus intime encore et portant sur la constitution même des atomes, comme celle dont nous avons connaissance dans le seul cas où elle semble se faire avec une rapidité suffisante, celui de la famille du radium, dont nous allons seulement dire un mot.

En présence des phénomènes radioactifs, nous nous trouvons encore à peu près dans la situation où l'on était vis-à-vis de l'électricité au début

¹ Voir L. DE LAUNAY, *La Nature*, 49 juin 1909 et 4 septembre 1909. Nous reviendrons sur cette idée au chapitre du radium.

du XIX^e siècle, ou même à la fin du XVIII^e. Nous voyons s'ouvrir devant nous tout un monde nouveau, mais un monde encore obscur. Faute d'instruments de mesure précis, nous n'avons encore qu'un aperçu vague de phénomènes que nous constatons les uns après les autres, en essayant plus ou moins adroitement de les grouper; et nous voyons craquer à chaque instant le cadre ancien, dans lequel nous nous efforçons de faire rentrer ces manifestations d'une activité nouvelle, sans pouvoir dire encore quel cadre nouveau il faudra lui substituer. Cette remarque s'applique tout particulièrement à la géologie, qui, jusqu'ici, a été nécessairement établie sans tenir compte de ces manifestations restées inconnues et où aujourd'hui il faut leur faire une place, sans pouvoir encore déterminer exactement laquelle. Le problème se pose aussitôt, et a été immédiatement posé par les physiciens, pour la chaleur interne que la teneur en radium de l'écorce terrestre suffirait seule à expliquer; il nous paraît devoir être envisagé également et avec non moins d'intérêt, pour tout ce qui touche à la métallogénie. Là surtout, en effet, les idées anciennes se trouvent singulièrement troublées par la possibilité nouvelle que l'on entrevoit de transmutations lentes, opérées en profondeur sur des métaux, jusqu'ici considérés comme immuables; et, sans même aborder cet ordre d'idées spéculatif, l'observation de chaque jour, qui nous montre la radioactivité si constante et si nette de toutes les eaux souterraines, conduit nécessairement à chercher de ce côté l'interprétation de certains phénomènes restés obscurs, où des filons métallifères se sont modifiés peu à peu depuis leur dépôt sans que les considérations de chimie ordinaire réussissent à nous en donner une explication pleinement satisfaisante. Vu la nouveauté complète du sujet, nous allons insister un peu sur ces divers points en groupant, pour chacun d'eux, les faits d'observation qui pourront donner lieu plus tard à une théorie homogène, encore impossible à établir dans l'état actuel de nos connaissances.

a) Possibilités de transmutation. — Toutes les théories métallogéniques ont été établies nécessairement d'après l'idée classique que le passage d'un métal à un autre était impossible, que là où l'on trouvait du plomb, ce plomb avait pu être engagé jadis dans d'autres combinaisons que celles actuellement constatées, mais qu'il avait toujours été plomb. Si nous venons seulement à envisager la possibilité que ce plomb ait été jadis quelque chose d'autre, on voit aussitôt la complication nouvelle qui en résulte, et la déroute où commencent par se perdre nos principes, en apparence les mieux assis. Il ne faut cependant pas exagérer les résultats de quelques expériences jusqu'ici limitées à des cas très restreints; mais on doit en tenir compte, et il n'est plus possible de rester endormi sur l'oreiller des vérités réputées acquises.

Les faits expérimentaux d'abord. En laissant de côté des expériences problématiques, ou même très vraisemblablement inexacts, comme celles qui ont fait sortir de l'acide carbonique de métaux divers, ou le lithium du plomb, il reste cependant la transmutation que l'on peut considérer comme démontrée de l'uranium en radium et de celui-ci en hélium. Si la forme qualifiée de radium, maintenant bien isolée avec son spectre propre, son poids atomique, ses combinaisons chimiques, ne correspond

pas à un état physique général réalisé avec une intensité particulière sur une certaine forme de matière (ce qui, en dernière analyse, revient un peu à une question de mots), nous voyons, sous nos yeux, naître du radium, qui n'a pas toujours existé dans le gisement où nous le rencontrons, et qui s'y détruit. On ne peut donc pas dire qu'il se soit constitué au début un gisement de radium ; il semble même beaucoup plus logique d'admettre que ce radium n'a généralement pas commencé par exister puisque, s'il datait d'une période géologique ancienne, il serait déjà détruit ; et nous nous trouvons là en présence d'un premier phénomène, particulièrement net, de modification ultérieure dans un gisement métallifère, modification que diverses considérations vont nous amener tout à l'heure à envisager comme liée en grande partie à la circulation des eaux souterraines : la production de radium aux dépens de l'uranium. Et cet uranium, à son tour, nous serions amenés à supposer sa production antérieure aux dépens de quelques autres corps, si nous n'avions la ressource de comparer le temps, malgré tout limité, qui s'est écoulé depuis la production de ces filons, avec les énormes durées de vie des éléments chimiques producteurs de cet uranium.

Mais cette constatation, une fois faite d'une façon précise, nous induit en tentation d'examiner si des phénomènes du même genre ne pourraient pas exister, indépendamment du radium, pour d'autres groupements de métaux que l'on s'était contenté d'expliquer approximativement par des considérations chimiques. On peut, en effet, remarquer que, si un corps dérive d'un autre pour en produire un troisième, les vitesses de désagrégation de ces trois corps étant différentes, il doit s'établir peu à peu un certain équilibre, correspondant à des proportions déterminées des trois corps : proportions qui ne se modifieront plus jusqu'au jour où le premier sera entièrement détruit. Or, il est facile de réunir des exemples de proportions définies, presque constantes, entre des métaux qui ne semblent pas néanmoins entrer en combinaison. Et, à côté d'une autre hypothèse plus simple, peut-être plus exacte, qui assimile ces sortes d'alliages ou de solutions solides aux combinaisons chimiques ordinaires, dans lesquelles nous ne nous étonnons pas, ayant une explication prête, de voir les éléments chimiques en rapports constants, il est loisible de songer à une telle transmutation, d'en poser tout au moins timidement l'hypothèse.

Parmi les faits de ce genre, il y a le cas de la galène argentifère, où la proportion d'argent (indépendamment des minéraux d'argent proprement dits) reste généralement au-dessous de 1/1 000 à 2/1 000. On peut citer également le rapport de l'argent à l'or dans les ors natifs, où l'argent peut atteindre 1/4. Dans les pyrites de fer il entre une proportion de cuivre qui ne dépasse guère 3 p. 100. Il s'y ajoute du nickel en proportion ne dépassant pas 1 p. 100 et du platine jusqu'à 1/10.000, etc.¹. Le fait que la proportion n'est pas constante mais reste au-dessous d'un certain maximum devrait, si l'hypothèse était exacte, se traduire par une évolution incomplète, n'ayant pas encore eu le temps de s'effectuer dans les galènes les moins argentifères. Il devrait donc y avoir, à conditions égales, un certain rapport entre la teneur en argent des galènes et l'âge de leur cristalli-

¹ Voir plus haut, page 33, des exemples de ces proportions.

sation primitive, d'où résulte le temps pendant lequel la transmutation ultérieure a pu s'opérer. En considérant, par exemple, trois galènes ou blendes, l'une cristallisée pendant le cambrien, la seconde pendant le carbonifère, la troisième pendant le tertiaire, on devrait y trouver une proportion moyenne des métaux accessoires, tels que l'argent, obéissant à une loi constante. Toutes les analyses que j'ai suggérées pour vérifier une semblable idée, non seulement dans le cas des galènes argentifères, mais aussi dans celui des blendes à indium, germanium, etc., conduisent à des conclusions négatives. Au moins dans les conditions où le problème a été abordé, il ne semble pas que les rapprochements signalés plus haut entre ces divers métaux correspondent réellement à des transmutations.

Mais on peut chercher dans un ordre d'idées plus restreint, en se bornant au groupe radioactif, pour lequel les phénomènes appartiennent au domaine expérimental, et il est permis de se demander maintenant si le développement de certains métaux dans les zones d'altération, tout en étant explicable par une simple concentration chimique, ne pourrait pas déceler également une action de ce genre.

b) Développement de radioactivité par altération. — Le problème se pose d'abord pour le radium lui-même. Il est très frappant de voir à quel point la radioactivité est un phénomène constant dans les eaux souterraines, et à quel point sa production, la production même du radium, semblent liées au passage de ces eaux souterraines¹. Sur le premier point, les innombrables analyses, qui se multiplient de tous côtés, concordent. On a d'abord constaté le fait pour les eaux thermales qui offraient un intérêt particulier, et où il semble bien, en effet, acquérir une intensité spéciale; on le retrouve dans les eaux quelconques. Pour ne citer qu'un exemple, un des soffioni de Toscane dégage à lui seul autant d'émanation qu'en pourrait donner un demi-gramme de radium. L'intensité du dégagement, le frottement à haute température contre des parois rocheuses semblent, pour une cause quelconque, intervenir dans ce développement radioactif, qu'il est peut-être insuffisant d'expliquer uniquement par un emprunt de radium aux parois en contact. Les dégagements gazeux profonds, tels que le grisou, sont également chargés d'émanation. D'autre part, on verra au chapitre du radium que, dans la plupart des cas où l'on trouve ce métal en quantités appréciables, l'altération ultérieure semble être intervenue. Il en est de même pour l'uranium qui accompagne logiquement le radium dans beaucoup de ses gisements. D'où l'idée rationnelle de songer à une réaction du même genre pour le baryum et le manganèse, également développés dans des conditions mal expliquées sur les zones d'affleurement: le baryum ayant, avec le radium, un rapprochement de poids atomique qui est connu. Le radium pourrait, par contre, être emprunté, comme le baryum, aux roches cristallines, dans lesquelles il en existerait des traces, que la concentration ultérieure mettrait en évidence. Nous nous contentons d'indiquer les deux hypothèses.

c) Transformations de minéraux par radioactivité. — En sortant même du domaine un peu spéculatif sur lequel nous nous sommes engagés

¹ Voir aux chapitres de l'uranium et du radium, tome II.

jusqu'ici, la présence du radium dans les eaux est à retenir pour expliquer diverses manifestations minérales, à l'occasion desquelles son influence possible est, non plus une hypothèse mais un fait d'observation. Tel est le cas des quartz enfumés que l'on trouve remplissant certaines grottes ou géodes des Alpes. On sait que du quartz blanc soumis au radium peut donner du quartz enfumé. Il est donc probable que, dans la nature, une influence analogue est intervenue. De même, avec le radium, on a décoloré le rubis et le saphir, fait passer la couleur des minéraux du bleu au vert, puis au jaune, etc. Ce sont des influences, soit sur les sels minéraux, soit encore plus sur les sels organiques que peuvent contenir diverses substances des terrains géologiques, auxquelles il y aura lieu de songer.

2° MÉTAMORPHISME RÉGIONAL ET LOCAL

Le métamorphisme est essentiellement une réaction de profondeur. Il a pu s'exercer sur nos gisements métallifères, soit lorsqu'ils étaient originellement profonds comme des remplissages filoniens, dans la période où ceux-ci n'avaient pas encore été ramenés au voisinage de la superficie où nous les trouvons en général, soit sur des gisements qui ont pu être autrefois presque superficiels, par un retour en profondeur dû à un accident tectonique.

Nous avons vu les actions de profondeur intervenir puissamment dans la formation des gites métallifères. On doit prévoir que ces actions ne se sont pas nécessairement limitées à la période qui a précédé le dépôt, mais ont dû pouvoir se répéter après coup, soit dans la phase même de la cristallisation première par une faible modification des conditions ambiantes, soit par un retour en profondeur subséquent.

a) Actions des roches ignées. — Lorsqu'on cherche dans la pratique les cas auxquels pourrait s'appliquer l'observation précédente, en dehors des circulations hydrothermales examinées plus loin, l'effet n'en apparaît pas souvent nettement avec une extension notable. Pour ce qui concerne le métamorphisme direct exercé par les roches éruptives, on ne saurait s'en étonner. Toutes les observations sur les terrains traversés par des roches éruptives montrent, en effet, combien est localisée l'action calorifique et directement métamorphisante d'un filon rocheux, même sur du charbon, à travers lequel on voit passer des porphyrites, des basaltes, etc., sans qu'il en résulte autre chose que quelques centimètres de coke. Elle est nécessairement bien moins apparente encore sur des minerais déjà cristallisés. Nous connaissons et nous aurons l'occasion de citer bien des gisements métallifères traversés par de telles roches éruptives, qui occasionnent souvent des rejets dans les bancs de conglomérats aurifères du Witwatersrand, dans les filons de Saxe, etc., sans qu'il en résulte pour les minerais une transformation caractérisée.

On observe cependant des actions métamorphiques de ce genre sur certains sédiments ferrugineux. Nous verrons, par exemple, dans les minerais scandinaves, l'oligiste faire place à la magnétite le long de granulites

transversales, dont l'action réductrice se trouve ainsi mise en évidence.

C'est également dans le cas des sédiments ferrugineux que l'effet d'un métamorphisme, non plus local mais régional, est le mieux caractérisé. Les sédiments ferrugineux, encaissés dans les terrains qui ont pris l'allure de gneiss, leptynites, ou simplement de quartzites, ont entièrement cristallisé à l'état d'oligiste et de magnétite et il en résulte même la presque impossibilité d'affirmer la nature primitivement sédimentaire de ces minerais. Ailleurs, il a dû arriver que les minerais soient enfouis sous une lame de charriage et influencés par ce mouvement imprévu.

b) **Eaux thermales ascendantes.** — Parmi les influences qui ont le plus couramment dû modifier un précipité métallifère une première fois cristallisé, nous avons déjà été conduits à envisager les circulations hydrothermales, qui ont dû se produire d'abord par la seule continuation du phénomène métallisant, mais qui ont pu ensuite se renouveler, dans des conditions différentes, à la suite de réouvertures.

Comme nous l'avons dit à l'occasion des remplissages successifs¹, une venue métallisante s'est rarement bornée à donner une seule forme de dépôt; elle a, en général, comporté des modifications nombreuses du milieu métallisant et chaque forme nouvelle de celui-ci a pu agir sur les formes antérieures.

On constate, d'autre part, fréquemment des eaux thermales actuelles sur des filons anciens, ou tertiaires ou même primaires. Ce qui se passe sous nos yeux par réouverture (ou par continuation du dépôt incrustant inachevé) a dû se réaliser, avec plus d'intensité, dans les périodes de superintensité métallogénique qui ont succédé au premier remplissage filonien. On arrive ainsi à l'idée, classique en métallogénie, de venues métallifères successives échelonnées, à des époques géologiques diverses, dans un même champ filonien, apportant chacune un type de solution métallisée différent et pouvant agir sur les produits antérieurs. Ces deux formes de réactions hydro-thermales méritent d'être examinées.

Si nous prenons d'abord les eaux thermales ascendantes dans la phase qui a suivi immédiatement le dépôt d'un minerai, il faut bien se représenter que, si ce minerai s'est déposé, c'est, comme nous l'avons expliqué dans un paragraphe antérieur, parce que l'équilibre instable de la solution s'est trouvé rompu à la suite d'une modification dans la température, dans la pression, dans la composition chimique de cette dissolution même ou de son milieu. Mais une telle modification, qui résulte des conditions mêmes d'une circulation en rapport avec des phénomènes ignés variables et instables, était de nature à subir une réaction inverse. Lors donc que le filon n'avait pas été obstrué entièrement ou qu'il s'était ouvert, s'il y a circulé de nouveau des eaux chaudes, un peu différentes par leur température, leur composition, etc., de celles qui avaient précipité, le minerai déposé a pu, comme nous l'avons dit, se redissoudre et il a pu y avoir ainsi transport de bas en haut, avec concentration connexe dans une zone favorable, amenant une nouvelle étape de précipitation.

Ce phénomène, dont nous avons examiné plus haut la possibilité pour

¹ Pages 147 et 162.

la phase même de la minéralisation, a pu, peut-être plus facilement encore, se produire plus ou moins longtemps après, quand une eau thermale a recommencé à circuler dans la réouverture d'un ancien filon. Cette eau thermale, à minéralisation généralement faible et, en tout cas, différente de la minéralisation primitive, était particulièrement apte à provoquer un tel déplacement de bas en haut, avec une concentration qui a dû surtout se faire à la limite de la zone où les eaux froides superficielles venaient se mélanger avec ces eaux thermales, les diluer et les refroidir. Ce sont là des phénomènes qu'il est généralement presque impossible de suivre dans leur application directe, mais auxquels on doit néanmoins songer pour expliquer certaines concentrations et cémentations décrites plus loin, qui ne se sont pas faites uniquement de haut en bas, comme celles examinées au chapitre x.

CHAPITRE X

ALTÉRATIONS EN RAPPORT AVEC LA SUPERFICIE ACTUELLE. MÉTASOMATOSES

- 1° GAS OU L'ALTÉRATION PORTE SUR UN GISEMENT PRÉEXISTANT. — ACTION DES EAUX DESCENDANTES. — ZONES DE PEROXYDATION ET DE CÉMENTATION. — APPLICATION AUX PRINCIPAUX MÉTAUX. — INTERVENTION DE LA SPÉLÉOLOGIE ANCIENNE OU RÉCENTE. — 2° GISEMENTS PRODUITS PAR DÉPLACEMENTS. — 3° CONSTITUTION DE GISEMENTS NOUVEAUX. LATÉRITISATION. MINÉRAIS DE FER EN GRAINS. PHOSPHATES, ETC. SÉCRÉTION LATÉRALE. — 4° CONSERVATION D'ALTÉRATIONS SUPERFICIELLES ANCIENNES. — 5° TRANSFORMATIONS SOUS-MARINES DES SÉDIMENTS.

GÉNÉRALITÉS. — CAUSES DE L'ALTÉRATION SUPERFICIELLE. — RAMENÉE AU JOUR PAR DYNAMISME OU ÉROSION. — LES EAUX SOUTERRAINES.

Le groupe de phénomènes que nous envisageons dans ce chapitre est, en principe, lié à la proximité de la superficie actuelle et dépendant du niveau hydrostatique actuel. Cette seule considération montre qu'il s'agit d'une transformation récente, opérée depuis que la superficie est devenue ce qu'elle est. Par extension, nous serons amenés en terminant à nous demander si certains phénomènes plus exceptionnels, analogues par leur allure à ceux que nous observons au voisinage du jour, mais situés sur des filons anciens à de grandes profondeurs, ne peuvent pas porter l'empreinte d'un état de choses disparu, d'une réaction continentale et superficielle remontant à une époque où la superficie était toute différente de celle que nous voyons.

Remarquons tout d'abord que, par définition même, si les altérations examinées au chapitre précédent dépendaient d'un retour en profondeur, celles que nous étudions ici sont solidaires d'une remontée au jour. Nous avons dit que des filons n'avaient pas dû, au début, s'incruster jusqu'à la superficie même. La partie que nous en voyons était une partie plus ou moins profonde. Nous la trouvons aujourd'hui, ou à la surface même, ou dans cette zone de 1.000 à 1.500 m. au plus qu'on peut bien qualifier de superficielle dans une étude théorique et jusqu'à laquelle descendent nos travaux. Il faut donc qu'elle ait été ramenée au jour, quel que soit le sens de ce mouvement relatif: soit qu'elle-même ait été remontée par un accident tectonique, soit de préférence que ce qui l'entourait ait été abaissé par l'érosion.

Le rôle des accidents tectoniques est suffisamment connu. Nous en avons déjà dit un mot au chapitre précédent. Du moment que nous trou-

vons à une altitude notable une masse épaisse d'anciens sédiments qui se sont formés autrefois dans la profondeur marine, il faut qu'un déplacement de ce genre soit intervenu. Les gites métallifères, englobés ou recouverts par ces sédiments, ont été remontés avec eux. Ils ont pu l'être assez pour qu'une zone, située autrefois dans leur profondeur, se trouve aujourd'hui haut au-dessus de la mer. Le rôle des érosions demande plus d'explication.

Rôle de l'érosion. — Cette érosion est un facteur essentiel à considérer dans tous les phénomènes géologiques, mais spécialement dans ceux que nous examinons ici. Comment agit-elle, nous n'avons pas à le dire en détail, les lois de cette action étant partout vulgarisées. Nous remarquerons seulement que l'altération préalable, à laquelle l'érosion se superpose d'ordinaire, facilite celle-ci. Dans bien des circonstances, on a la preuve qu'un gîte métallifère a commencé par être altéré et ainsi rendu friable, en même temps que se produisaient déjà certaines concentrations chimiques de métaux. Après quoi, l'érosion s'est exercée plus aisément sur ces parties devenues meubles et, remaniant des minerais déjà enrichis chimiquement, elle a pu les enrichir une seconde fois mécaniquement. Si nous considérons l'influence des érosions sur les concentrations métallifères, nous voyons que ces érosions ont deux effets principaux. Elles font apparaître au jour des éléments qui, sans elles, seraient restés profonds et, d'autre part, elles remettent en mouvement mécaniquement, ou même chimiquement, les diverses parties des massifs érodés. Il résulte de ce dernier phénomène, que nous étudierons plus tard au chapitre xi, tous les gisements sédimentaires, dont aucun, on peut le dire, n'existerait sans les érosions : les apports directs de la profondeur ignée dans un bassin de sédimentation par volcanisme ou sources thermales nous semblant, comme nous aurons maintes occasions de le dire, devoir être réduits au minimum.

Quel est le travail accompli par les érosions ? Dans l'état actuel du régime fluvial, si incomparablement inférieur à ce qu'il fut pendant les premières phases du pléistocène, on a calculé, en considérant seulement les matériaux emportés par les fleuves, que la superficie terrestre totale devait perdre en moyenne 1 m. par 10 000 ans. En tenant compte des éléments dissous, on voit que quatre millions d'années au maximum suffiraient pour ramener la terre entière au niveau de la mer.

Mais ce chiffre n'a évidemment aucun rapport avec ce qui s'est passé dans des périodes plus anciennes.

Des exemples nombreux montrent que, dans certains cas, des kilomètres de terrains ont pu être détruits et emportés ailleurs pour s'y résédimer dans de nouveaux bassins. Quelquefois on semble saisir sur le fait un mouvement du sol corrélatif de l'érosion. La chaîne continue à surgir en même temps qu'elle se détruit. Simultanément, et pour la même cause, le bassin de sédimentation, où s'entassaient ses produits meubles, s'approfondit. C'est ce qui explique le dépôt de si énormes masses de terrains, accumulées avec des épaisseurs de plusieurs milliers de mètres et des formes qui accusent néanmoins sans cesse une sédimentation presque superficielle. La saillie monte en se détruisant à mesure ; le bassin s'approfondit, tout en se comblant ; et, finalement, il en résulte, avec une rapidité plus grande qu'on ne l'aurait cru, une nouvelle forme

d'équilibre, où le relief momentané du sol se trouve à peu près nivelé.

Indépendamment des mouvements tectoniques, toute chaîne saillante se détruit sans cesse, son relief s'émousse, les vallées se comblent, la montagne tend à se transformer en une pénéplaine. On voudrait donner des chiffres représentatifs de cette érosion. Ces chiffres, on ne peut les calculer que là où ils sont évidemment un minimum : dans les régions à strates horizontales, où on apprécie aisément, par comparaison avec des régions voisines, les épaisseurs de terrains qui manquent après avoir dû exister. Il est bien évident que les épaisseurs enlevées, que les saillies primitives ont dû être tout autres, là où les terrains, plissés, disloqués, renversés, comme ils le sont précisément dans les chaînes montagneuses, ne se prêtent plus à des mesures de ce genre.

La disparition de lames entières de charriage, dont il reste à peine des indices ou des racines sur les massifs hercyniens, est une preuve, entre beaucoup d'autres, de l'intensité énorme des érosions. Dans bien des cas, ce que nous voyons est le substratum de telles lames, qui s'est trouvé un moment ramené en profondeur par le passage au-dessus de lui de montagnes entières charriées et que l'érosion a fait ensuite reparaitre au jour.

Ailleurs, comme dans le Derbyshire, des filons encaissés dans le calcaire carbonifère renferment des fossiles empruntés à un recouvrement de houiller productif aujourd'hui disparu. On a même trouvé à Charterhouse (Mendip Hills), à plus de 80 m. de profondeur, en rapport avec un remplissage bien régulier de calcite et de galène, des galets à fossiles liasiques représentant 113 espèces distinctes. C'est donc ici le houiller, le permien, le rhétien et le lias, qui ont été éliminés.

Nous n'avons, dans des cas pareils, qu'un moyen d'apprécier ce qui a pu disparaître, c'est de le comparer avec ce qui reste et de faire cette hypothèse si vraisemblable que les montagnes de l'époque hercynienne ont commencé par être semblables aux montagnes actuelles d'âge récent. Quelle hauteur faudrait-il enlever des Alpes, qui sont déjà cependant des montagnes fortement attaquées par l'usure, pour les réduire à la topographie des Ardennes sur une superficie comparable à celle des plateaux hercyniens : peut-être 4.000 m. Un filon, que nous voyons aujourd'hui affleurer dans un semblable plateau, aurait donc pu avoir, au-dessus de lui, quand il a cristallisé d'abord, 4.000 m. de terrains maintenant disparus. Dans ces conditions, il est impossible de penser, pour les modifications que nous constatons aujourd'hui dans les filons au voisinage de la superficie actuelle, à une influence quelconque de cette superficie. Si le chiffre paraît élevé et hypothétique, on peut se borner aux mesures directes dont j'ai groupé quelques résultats ailleurs¹.

Ayant été ramené au voisinage de la superficie actuelle par le dynamisme ou par l'érosion, un gisement métallifère déjà existant, ou un simple terrain susceptible de donner par son altération un gîte métallifère nouveau, sont soumis à l'action des eaux souterraines descendantes d'origine superficielle. Les réactions qui en résultent diffèrent, comme nous allons l'expliquer, suivant les conditions de profondeur et de circulation où elles se présentent. Mais, dans l'ensemble, elles sont l'opposé

¹ *Science géologique*, p. 331 à 339.

des réactions de voie ignée, ou tout au moins de profondeur, précédemment envisagées.

Parmi les actions de profondeur, celles où interviennent les influences ignées sont en principe conservatrices et fixantes. Elles ont pour effet de déterminer des combinaisons entre les éléments chimiques qui ne s'associent pas à la température ordinaire, de grouper à leur tour les cristaux élémentaires produits en des roches dures et d'assurer à celles-ci une certaine homogénéité. Ayant nécessité l'intervention de la chaleur pour se produire, ces réactions, qui ont exigé une dépense de calorifique, ont emmagasiné de la force vive. Un des termes les plus caractéristiques en est la combinaison de la silice avec les métaux sous la forme de silicates qui, s'associant, constituent la plupart de nos roches. Les minerais proprement dits à leur tour, oxydes, sulfures, silicates, sont englobés dans ces réseaux pétrographiques. S'il y a seulement circulation hydrothermale, celle-ci est réductrice et ascendante.

Les actions de surface produisent, au contraire, en principe, un effet inverse. Les combinaisons s'y désagrègent peu à peu, les cristaux tendent à se disjoindre, les éléments qui les constituent se séparent de leur côté. Les sulfures métalliques se sulfatisent et se dissolvent. La silice, par exemple, entre en liberté. Les combinaisons complexes, réalisées par la voie ignée, se simplifient; un feldspath donnera d'abord un silicate d'alumine, puis de la silice libre et de l'alumine, etc. Progressivement, on voit des éléments, comme le fer, le magnésium, les alcalis, le calcium, le baryum, le phosphore, etc., qui étaient disséminés dans les roches, tendre à se rassembler, à se concentrer en des points d'élection. Les éléments chimiques s'oxydent et adoptent, entre les oxydes, la forme la plus stable d'après les lois de la thermochimie à la température et dans les conditions considérées : sesquioxyde de fer, bioxyde de manganèse. Enfin les dissolutions opèrent par voie descendante.

Le caractère essentiel (sur lequel j'ai déjà insisté) de ces altérations superficielles est d'être des réactions lentes opérées par des dissolutions étendues et complexes. Les eaux de surface renferment toujours, en petites quantités, de l'acide carbonique, du chlorure de sodium, etc., qui suffisent pour provoquer des dissolutions étendues de corps réputés insolubles dans l'eau pure, comme la silice, le sulfate de baryte, etc., et ces eaux minéralisées possèdent, en raison même de cette extrême dilution, des propriétés toutes particulières pour les actions d'osmose et de capillarité. La géologie doit envisager sans cesse ces dissolutions homéopathiques, auxquelles, après les avoir combattues, la science revient peu à peu. D'où les pseudomorphoses qui introduisent de la silice, de la barytine, de la fluorine dans des minéraux.

Il faut également attribuer à cette dilution et à cette lenteur, la pénétration d'eaux allant agir chimiquement à l'intérieur de corps qui semblent d'abord absolument compacts. On voit, dans des masses de quartzite ne présentant l'apparence d'aucune fissure, des vides remplaçant des cubes de pyrite récemment dissous. Des argiles, des agates peuvent absorber des solutions qui les colorent, ou modifient leur composition apparente, etc.

Ces altérations de surface commencent en principe par une dissolution,

suivie d'un déplacement, qui peut être très bref s'il y a, sous une autre forme, reprécipitation immédiate, mais qui n'en existe pas moins. Les phénomènes ultérieurs peuvent, comme nous allons le dire, se diviser en plusieurs zones : l'une de peroxydation, l'autre de cimentation, etc. Ils sont, nous le verrons, nettement dépendants de la position du niveau hydrostatique au moment où ils se produisent. Si l'on imaginait donc que le niveau hydrostatique put être rigoureusement fixé dans une position immuable, les réactions en question acquerraient elles-mêmes une forme d'équilibre, dans laquelle elles se maintiendraient. Mais le niveau hydrostatique est constamment amené à varier pour deux causes principales, dont l'une, l'érosion, agit toujours dans le même sens pour abaisser peu à peu le niveau des eaux, tandis que l'autre, les mouvements tectoniques du sol, peut, suivant le sens relatif de ces mouvements, provoquer aussi bien un relèvement qu'un abaissement de ce niveau. C'est un point qui sera examiné en terminant.

1° ACTION DES EAUX DESCENDANTES. — SON MÉCANISME. CONSIDÉRATION DE LA SURFACE HYDROSTATIQUE¹

Rôle de la surface hydrostatique — Constamment nous voyons de l'eau s'infiltrer dans la Terre, et, sans cesse, nous voyons de l'eau en ressortir. L'idée que ces eaux d'infiltration accomplissent un circuit souterrain pour reparaitre en sources est donc toute naturelle et très ancienne. Quand on exécute un travail souterrain quelconque, il arrive toujours une profondeur où, si l'on rencontre une fracture, cette fracture est remplie d'eau². Et, lorsqu'on peut étudier cette fracture aquifère pendant un temps suffisamment long, on constate que le niveau de l'eau y adopte une position moyenne, autour de laquelle il peut osciller quand le régime météorologique est, ou particulièrement sec, ou particulièrement pluvieux, mais dont il s'écarte peu.

Tous les points, où l'eau s'élève ainsi dans les fractures, puits et sondages d'une région, déterminent ce qu'on appelle *la surface hydrostatique*. Cette surface peut être formée de plusieurs nappes et se compliquer quand le terrain renferme des parties imperméables, alternant avec des parties perméables. Mais, complexe ou simple, la surface hydrostatique sépare toujours par définition deux zones qui vont se trouver, pour toutes les réactions chimiques, dans des conditions très différentes : l'une au-dessus, où

¹ Voir une étude générale de cette question dans la *Science géologique*, p. 309 à 331, et dans le *Traité des sources thermo-minérales*.

² Si l'on a pu citer des exemples curieux et exceptionnels de mines remarquablement sèches en profondeur, telles que la Calumet and Hekla ou le puits Adalbert de Przibram, cela ne saurait infirmer la loi physique, qui veut que, par son seul poids, l'eau superficielle tende à descendre, tant que la pression, la capillarité ou la chaleur ne la font pas remonter. On peut même dire que de semblables anomalies doivent plutôt se présenter à de grandes profondeurs, quand la compacité des roches superposées ne laisse pas d'accès aux eaux superficielles ou quand celles-ci ont déjà été drainées ou épuisées plus haut ; mais, immédiatement au-dessous des terrains, où se fait la circulation rapide destinée à alimenter les sources, il n'en est pas de même et l'on est en droit d'admettre qu'il existe là une zone profonde imbibée d'eau en permanence. Cependant, le manque d'eau dans certains travaux de mine tient aussi à ce que l'eau souterraine se trouve attirée plus profondément par un drainage lointain.

la circulation des eaux se fait rapidement de manière à alimenter des sources prochaines, en sorte qu'il y arrive sans cesse des eaux nouvelles, réalimentées en oxygène, acide carbonique, etc., au contact de l'air et où des périodes de dessiccation peuvent succéder à des périodes d'ennoyage ; l'autre au-dessous, où la circulation a lieu, au contraire, très lentement vers un point de sortie très éloigné et où les eaux, restant au contact des mêmes terrains sans recevoir elles-mêmes d'apports chimiques nouveaux, doivent devenir bientôt incapables d'oxydations, carbonatations, etc.

Cette surface hydrostatique dessine, on le sait, dans les coupes en terrain homogène, une courbe allant se raccorder avec la vallée de drainage qui la régit. Quand il y a intercalation de bancs imperméables, chacun d'eux détermine au-dessus de lui une petite nappe aquifère adventive et précaire qui alimente un niveau de sources.

La profondeur, à laquelle se présente cette surface hydrostatique, est extrêmement variable suivant la topographie du sol et sa constitution géologique. Il est des zones où la surface hydrostatique touche au sol. Les eaux de ruissellement peuvent alors couler sans se perdre. C'est ce qui se passe dans les grandes vallées à rivières permanentes. Ailleurs, il faudra descendre d'une centaine de mètres ou plus pour trouver l'eau : par exemple dans les grands massifs calcaires découpés par de profondes vallées encaissées, dans les Causses ; dans la Beauce, dans le Karst, dans la Dobroudja bulgare, etc. Enfin, dans les chaînes à brusques accidents comme les Andes, c'est plusieurs centaines de mètres que les infiltrations doivent parfois traverser avant d'atteindre la surface hydrostatique.

Sans brusque relief, le niveau hydrostatique peut être très bas dans certaines régions à la fois élevées topographiquement et arides ; ce qui permet d'expliquer bien des persistances singulières de minéraux altérés à de grandes profondeurs. Ainsi à Mapimi (Mexique), les mines de plomb argentifère n'ont rencontré l'eau qu'à 700 m. Dans une région exceptionnellement désertique, on a pu se demander si ce niveau ne pourrait pas se trouver déprimé au-dessous du niveau général, l'eau venant alors de celui-ci au lieu d'y affluer. Mais ce cas paraît tout théorique et n'est peut-être nulle part réalisé.

Parfois, dans le même district, on rencontre l'eau à des profondeurs très irrégulières. Ainsi, à Tintic (Utah), dans un pays aride, l'eau arrivait très près de la surface dans la monzonite compacte et disparaissait, au contraire, à 500 m. de profondeur au voisinage, dans des calcaires fissurés. A Butte (Montana), on constate l'altération superficielle par de telles eaux dans le granite jusqu'à plus de 600 m.

John Finch, au Colorado, a assigné une étendue totale de 300 à 450 m. à la circulation des eaux de surface (ground water), comprenant la zone de peroxydation (gathering), la zone de cémentation (discharging) et ce qu'il a appelé la zone statique¹.

Il est évident qu'au moment des plissements et des dislocations, où se sont produits les filons et les roches éruptives, l'eau de surface est des-

¹ 1904. JOHN FINCH. *The circul. of underground aqueous solutions and the depos. of lode ores* (Proc. Col. Sc. Soc., t. 7, p. 193-252).

condue plus bas que dans une période régularisée comme la nôtre. En outre, il ne peut y avoir d'eau rigoureusement permanente, au moins au-dessus du niveau de la mer, ou du niveau déterminé par l'écoulement des eaux vers la mer : l'eau même permanente ayant une tendance à s'écouler lentement. Et, plus bas encore, dans les nappes artésiennes, il y a la pression par derrière susceptible de faire remonter l'eau dans les tuyaux individualisés. C'est un cas que l'on a eu souvent le tort d'oublier.

Souvent, pour bien des raisons, il arrive donc qu'au-dessous de la zone généralement altérée, à limitation nette, on retrouve, dans une zone qui paraissait intacte, des indices très localisés d'un commencement d'altération, peut-être amenés par quelques fissures adventives. De même certaines parties de la zone altérée ont pu échapper à l'altération.

Ainsi, dans le groupe plombeux de Peñarroya on a rencontré de beaux cristaux de gypse (produit normal d'altération) vers 400 m. de profondeur.

De même, pour le cuivre argentifère, nous verrons que, dans les filons du Montana, en moyenne, la zone de peroxydation a eu 60 à 120 m. ; puis, au-dessous, la zone de cémentation 60 m. ; après quoi, on est entré dans des pyrites cuivreuses qui, d'après leur teneur en cuivre, ont bien des chances pour avoir déjà subi un commencement d'enrichissement local. On retrouve, dans ce groupe, des minerais d'altération jusqu'à plusieurs centaines de mètres au-dessous du niveau hydrostatique. Des blocs de covelline (minerai d'altération) ont été trouvés à 330 m., dans une mine de Butte City ; mais surtout il est constant d'avoir là, dans les pyrites profondes de ce groupe, des inclusions de chalcosine (autre minerai altéré).

L'idée qu'on doit concevoir de la surface hydrostatique n'est donc pas celle d'une surface géométrique. Comme je l'ai montré dans d'autres ouvrages, les eaux qui restent au-dessus de cette surface alimentent les sources ordinaires. Les eaux qui descendent au-dessous par suite de leur emprisonnement, soit dans une fracture, soit au-dessous d'une couche imperméable, alimentent les sources vauclusiennes, les nappes artésiennes et enfin les eaux thermales. Ces eaux profondes, ayant fait un long séjour dans un milieu pauvre en oxygène, deviennent à peu près incapables de réactions chimiques autres que des dissolutions directes ; mais cette règle ne saurait être absolue. Elles peuvent, dans une première approximation, être considérées comme en équilibre définitif avec les phases qu'elles baignent.

Effet général des eaux descendantes. Intervention des calcaires. — Nous avons déjà envisagé, dans les chapitres précédents¹, les effets que l'on peut attribuer aux eaux thermales ascendantes ; il reste à examiner ceux des eaux descendantes ordinaires

L'effet de celles-ci consiste d'abord à dissoudre les éléments rencontrés sur leur chemin, y compris ceux qui seraient insolubles dans l'eau pure, mais qui deviennent solubles par oxydation ou carbonatation (sulfures transformés en sulfates, bicarbonates de chaux, fer, etc.), ou

¹ Pages 146 et 147.

encore par l'intervention fréquente de chlorures, nitrates, d'acides organiques, etc. Après quoi, ces dissolutions sont reprécipitées un peu plus loin par peroxydation, dégagement de l'acide carbonique en excès, réduction, saturation, etc., ou, plus rarement, entraînées à la surface vers les fleuves et la mer. La reprécipitation peut avoir lieu presque sur place ou dans les terrains immédiatement encaissants. Elle peut également — et c'est une remarque importante pour les filons — être provoquée par la descente des eaux métallisées le long du plan filonien jusqu'au moment où ces eaux rencontrent la nappe permanente au-dessous du niveau hydrostatique, s'accablent à son contact et y atteignent la saturation.

Il y a, dès lors, avant tout, tendance superficielle à la suppression des éléments solubles et à l'enrichissement relatif de ceux qui se dissolvent moins aisément ; mais, parmi les éléments dissous, ceux que reprécipite une circonstance couramment réalisée (par exemple, le contact de l'oxygène en excès pour le fer ou le manganèse), ne vont pas loin et se redéposent à proximité. Accidentellement, des corps solubles peuvent eux aussi être amenés à se reprécipiter en certains cas.

Plus profondément (et c'est ce qui constitue la cémentation) certains métaux vont s'accumuler. Des minerais, même parmi ceux qui semblent les moins solubles, non seulement des sulfures de zinc, cuivre, argent, mais aussi l'or, la cassitérite, la barytine, la fluorine, etc., subissent un entraînement descendant, dont résulte, à mesure que les affleurements filoniens sont détruits par l'érosion, une descente de presque tout le métal compris dans la partie détruite plus haut, et, par suite, une concentration croissante vers l'endroit où se trouve la surface hydrostatique actuelle¹.

Toute théorie relative à ces phénomènes doit distinguer au moins deux zones superposées de très inégale importance : l'une, au contact de l'air, où domine l'action de l'oxygène, tandis que l'acide carbonique en excès tend à s'évaporer ; l'autre, plus profonde, où l'oxygène est moins abondant et où, au contraire, l'action de l'acide carbonique domine.

Nous appellerons la première zone, généralement peu épaisse, *zone d'oxydation*. C'est celle, où, par exemple, à la surface d'un plateau calcaire qui s'attaque, le fer en excès se précipite à l'état de peroxyde : zone, par conséquent, caractérisée par sa rubéfaction. En même temps, se reprécipiteront aussi les éléments, qu'un excès d'acide carbonique maintenait seul plus bas en dissolution.

La zone plus profonde, qui occupe ensuite toute la hauteur jusqu'à une certaine profondeur au-dessous du niveau hydrostatique, est celle des *cémentations*, des *décalcifications*, ou, plus généralement, des *concentrations chimiques*. C'est la zone d'enrichissement des filons d'or, d'argent, de cuivre, de cobalt, de manganèse ; c'est la zone, où les terrains calcaires perdent peu à peu leur chaux et souvent se chargent de silice, où les roches magnésiennes s'appauvrissent en magnésie, etc.

Parmi ces réactions si diverses, je laisse de côté pour le moment celles

1. La descente des eaux, que j'imagine ici, apparaît souvent de la façon la plus nette. Ainsi le terrain houiller de la Machine (Nièvre), qui a été recouvert par le trias, contient souvent de véritables filons de gypse, empruntés à ce trias et redéposés plus bas dans ses fentes.

qui modifient un terrain ou une roche quelconques pour me borner d'abord à l'action sur un gîte métallifère préexistant : filon, amas filonien, sédiment métallisé, etc. Dans un paragraphe suivant, nous verrons comment un gîte nouveau peut se constituer aux dépens de roches réputées stériles¹.

Les eaux pluviales renferment une quantité d'éléments gazeux qui n'est pas moindre, d'après Pélignot, de 8 cc. d'oxygène et 0,6 cc. d'acide carbonique par litre. Ces eaux se chargent encore, au contact des matières organiques, d'une certaine quantité d'acide carbonique, à laquelle peut s'ajouter, dans les terrains calcaires, l'effet de doubles réactions chimiques venant accroître la proportion de ce gaz. Il en résulte que leur effet ordinaire est une oxydation ou une carbonatation. Mais, en outre, les sulfures très abondants dans certains terrains, notamment les pyrites de fer, donnent des sulfates et de l'acide sulfurique; le chlorure de sodium, contenu dans toutes les roches cristallines, entre en dissolution, indépendamment même de toute intervention marine ou de la présence de gîtes de sel préexistants; le nitrate est produit par des fermentations. On doit donc envisager l'action des eaux superficielles sur les minerais, comme celle d'une liqueur chimique renfermant de l'oxygène et de l'acide carbonique gazeux, avec des chlorures, sulfates et nitrates divers (notamment alcalins ou alcalino-terreux).

Le cas le plus fréquent qui se présente dans un gîte métallifère, est celui d'un ensemble sulfuré complexe, soumis à une action oxydante et ce cas peut également se subdiviser, d'une façon très nette, suivant que le terrain en contact est à peu près inerte, comme un grès, un schiste, une roche cristalline, ou, au contraire, calcaire, c'est-à-dire susceptible de fournir de l'acide carbonique et de produire, par conséquent, des carbonates métalliques. Accessoirement et dans la zone tout à fait superficielle, il peut intervenir, en outre, du chlore, du brome, de l'iode ou des matières organiques réductrices. D'autres gisements peuvent également renfermer des oxydes ou silicates de fer ou de manganèse, de l'oxyde d'étain, de l'or natif, etc.².

La présence d'un milieu calcaire introduit, dans l'évolution, des termes intermédiaires et facilite les réactions, d'autant plus que les calcaires très fissurés activent généralement l'infiltration des eaux. Le résultat final, si le phénomène avait eu le temps de s'accomplir entièrement, devrait, il est vrai, se retrouver le même que sans son intervention; mais, comme le facteur temps a, dans toute cette catégorie d'altérations, une influence prépondérante, les réactions, généralement incomplètes, se traduisent, en terrains calcaires, par des formes minéralogiques différentes de celles qu'on retrouve en terrains inattaqués et nous devons, soit dans ce chapitre, soit dans toutes les études relatives aux divers métaux, établir une distinction fondamentale suivant que le milieu encaissant est calcaire ou inattaquable aux eaux chargées d'acide carbonique.

¹ Page 196.

² Voir mes divers travaux antérieurs : *Contribution à l'étude des gîtes métallifères* (Annales des Mines, 1897); *Variations des filons en profondeur* (Revue générale des Sciences, 30 avril 1900); *Géologie pratique*, 1901, p. 62; *Les Richesses minérales de l'Afrique*, 1903 (*passim* et particulièrement, chapitres sur l'Algérie) et *Science géologique*, p. 323 à 331, dont j'extrais le paragraphe suivant.

Dans tous les cas, d'ailleurs, si les réactions ont pu se poursuivre jusqu'à leur terme et s'il n'est survenu aucune action réductrice étrangère, ou aucune influence calorifique, la marche suivie par cette métallurgie naturelle est, en principe, de séparer les métaux d'après la solubilité de leurs sulfates ou de leurs carbonates, d'éliminer les métaux dont les sels peroxydés sont solubles et de laisser, comme résidu, pour les autres, la combinaison la plus stable, ayant développé le plus de calories en naissant, telle que le sesquioxyde de fer, le bioxyde de manganèse, le carbonate de zinc, etc.

Supposons, d'abord, un milieu inerte et un mélange sulfuré complexe en profondeur ; l'altération portera, avant tout, sur les sulfures de fer et de cuivre, qui se dissoudront à l'état de sulfates ; mais le premier se reprécipitera bientôt en sesquioxyde, tandis que le second disparaîtra ou à la surface ou en profondeur et, finalement, l'on trouvera, sur les affleurements, ces grandes masses d'oxyde de fer, ces « chapeaux de fer » des anciens mineurs, où les métaux à sulfates solubles, tels que le cuivre, font défaut, tandis que les métaux à sulfates insolubles, comme le plomb, peuvent subsister à peu près inaltérés.

C'est là, par définition même, la zone d'oxydation ; mais, plus bas, vient la zone de cémentation, où l'on observe parfois, dans ces mêmes gisements complexes, pour le cuivre, l'argent et l'or, des enrichissements tout à fait caractéristiques. La zone, située au-dessous du chapeau de fer, est alors, comme je vais le dire bientôt, celle de la richesse maxima pour ces trois métaux¹.

Quand le même mélange sulfuré se trouve encaissé en terrain calcaire, le fer, le zinc, le plomb, le cuivre peuvent passer par la forme carbonatée, mais avec cette différence que le carbonate de fer tend lui-même à donner du sesquioxyde et que le carbonate de plomb se produit assez difficilement, tandis que les carbonates de zinc et de cuivre représentent des types stables, pouvant se maintenir aux affleurements. La zone d'oxydation sera alors caractérisée par de l'oxyde de fer ou par de la calamine rouge, c'est-à-dire chargée d'oxyde de fer parce qu'elle s'est formée sur place à côté de pyrite altérée ; puis la zone de cémentation par du carbonate de fer ou de la calamine blanche, réalisée par déplacement hors de la zone ferrugineuse. Après quoi, l'on retrouvera en profondeur les trois sulfures caractéristiques, blende, pyrite, galène, avec appauvrissement relatif de la teneur en or, en argent et en cuivre : métaux ordinairement concentrés, comme je l'ai dit plus haut, dans la zone de cémentation.

Les deux cas très généraux, que je viens d'indiquer, rencontrent, dans la nature, d'innombrables applications. J'ai montré, par exemple², que la plupart des gites algériens, entre lesquels on avait établi autrefois une foule de distinctions, se ramènent à ce même assemblage de sulfures

¹ On remarquera qu'avec les réactions descendantes, auxquelles nous attribuons ici la cémentation, peuvent s'associer les réactions ascendantes thermales dont il a déjà été question : les deux phénomènes concordant pour amener certains métaux dans la zone restée un peu au-dessous du niveau hydrostatique.

² *Les Richesses minérales de l'Afrique*, 1903.

complexes, tout à l'heure signalé, où interviennent parfois, en dehors des métaux précédemment cités, le mercure et l'antimoine. Naturellement, la proportion de chacun d'eux varie suivant les cas ; mais les règles restent les mêmes et l'on peut établir, en principe, que, dans la zone haute de tels filons métallifères, le sesquioxyde de fer superficiel provient, soit de pyrite, soit de sidérose, : cette dernière, en milieu calcaire, ayant elle-même bien des chances pour résulter de pyrites, et que la calamine et la cérusite sont toujours des produits d'altération de blende ou de galène, de même que la malachite provient de sulfure de cuivre, l'oxyde d'antimoine de la stibine, etc.

Il va sans dire que ces réactions peuvent être plus ou moins complètes suivant les cas. On trouvera, par exemple, cette anomalie d'un gîte pyriteux subsistant, à peine altéré, en milieu calcaire, s'il y a très peu de temps que l'érosion l'a mis à jour, ou, au contraire, d'une calamine se continuant dans les profondeurs les plus grandes d'une mine sans passage à la blende, si l'altération a été là très prolongée et complète : par exemple, s'il s'agit d'un débris d'une chaîne ancienne enfoncé plus tard en profondeur.

Dans toutes ces réactions, la proportion relative des divers métaux se trouve modifiée sensiblement par l'altération superficielle et souvent dans un sens favorable aux besoins industriels, parce que les métaux enrichis sont les moins solubles, les moins altérables, qui sont, en même temps, on le sait, les plus denses et les plus recherchés. Les lois, dont il est question ici, ont donc une importance pratique capitale, puisqu'elles permettent de prévoir la disparition en profondeur de l'or libre, de l'argent natif et des minéraux d'argent proprement dits, des cuivres gris, des calamines, des cérusites, comme des pyrolusites.

Application aux principaux métaux. — Nous aurons à revenir plus tard sur le cas particulier de chaque métal ; mais notons dès à présent quelques observations générales sur chacun d'eux.

L'or peut être associé en profondeur à des sulfures, séléniures, telluures, arséniures ou antimoniures ; le plus souvent, on l'y trouve avec de la pyrite, du mispickel, ou de la chalcopyrite. Dès lors, dans la zone d'oxydation, on aura de l'hématite, parfois légèrement arsénicale, où l'or se trouvera mis en liberté.

Avec une masse composée presque exclusivement de sulfure de fer, il ne saurait y avoir de zone de cémentation proprement dite, puisque le sulfure s'altère aussitôt en sesquioxyde ; néanmoins, les parties les plus basses de la zone oxydée présentent souvent un certain enrichissement en or et c'est là surtout qu'il semble y avoir eu « nourrissage », développement de cristaux d'or, qui arrivent à prendre parfois des dimensions dont on ne trouve plus l'équivalent dans les filons intacts : par exemple, ces sortes de végétations d'or, qui semblent suinter par toutes les fissures des quartz aurifères altérés.

A la zone d'oxydation correspondent également toutes ces « terres rouges », ces « terres à ravets », etc., où, dans la zone équatoriale, on rencontre de l'or disséminé sur de grandes étendues, à Madagascar, à la Guyane, au Vénézuéla, etc. C'est le simple résultat de la décomposition

sur place de roches, où pouvaient se trouver des veines ou des mouches de pyrite aurifère.

J'ajoute encore que, pour l'or, cette concentration chimique première dans la zone d'altération a précédé la concentration mécanique des alluvions et a ainsi entraîné parfois, dans celles-ci, une teneur, qui peut sembler hors de proportion avec celles des gisements originels.

L'argent est, en profondeur, le plus souvent associé avec de la galène, parfois avec des *chalcopyrites* ou des *blendes*. L'altération des filons d'argent produit, en principe, deux zones caractéristiques :

1° A la surface, au milieu d'argiles terreuses et chargées d'oxydes de fer, on trouve les oxydes d'argent et l'argent natif — accompagnés de chlorures, bromures, iodures, etc., quand des eaux salines sont intervenues dans l'altération —. A l'oxyde de fer peuvent s'associer les oxydes de manganèse et les oxydes ou carbonates de cuivre, si ces métaux existaient en profondeur.

En même temps, il subsiste parfois de la galène inaltérée, ou, si l'on est en terrain calcaire, de la cérusite avec d'autres formes d'altération du plomb, telles que l'anglésite, la mimétèse, la pyromorphite, la wulfénite et de la calamine remplaçant la blende plus profonde. C'est la zone de suroxydation, généralement appauvrie en argent, par suite du départ d'une fraction de celui-ci, qui a pu, soit être entraîné au dehors, soit se précipiter plus bas.

2° Au-dessous, vient la zone des cémentations complexes, des réactions chimiques, où, par suite de la disparition du fer et d'une partie du zinc, par suite également de la contribution fournie par les parties supérieures disparues et érodées, la teneur en argent s'est élevée. Ce métal est là en sulfures et en sulfo-antimoniures (argents noirs et rouges), parfois encore un peu en argent natif. Le développement de l'antimoine peut, comme nous l'avons dit¹, s'y expliquer par des réactions ascendantes.

Enfin, 3° quand on a dépassé la zone modifiée, que limite à peu près le niveau hydrostatique, on entre brusquement dans la zone des sulfures complexes, où l'argent se retrouve incorporé dans les galènes et les blendes : c'est-à-dire que les minerais se montrent, à la fois, plus pauvres et plus difficiles à traiter.

On a eu des exemples remarquablement nets de ce passage dans des mines comme celle de Broken-Hill, en Australie, où un gisement de BGP, très plombé, intercalé dans les schistes cristallins, a été profondément altéré. Comme on le verra sur la coupe de ce gisement (fig. 360), on a en partant du haut, une zone de kaolin argentifère riche en grenats et, à la base de celle-ci, une zone mince de cémentation, où la teneur en argent a atteint près de 8 kg. à la tonne; puis, plus bas, des sulfures intacts. La cémentation de l'argent à la base de la zone altérée est ici on ne peut plus nette². Au Sarrabus, en Sardaigne, on a eu également disparition de l'argent en atteignant le niveau hydrostatique. La loi atteint souvent,

¹ Page 142. Cf. VAN HISE. *Some principles controlling the deposition of ores* (Trans. Am. Inst. Min. Eng. fév. 1900).

² Dans bien des cas, on a remarqué ainsi un enrichissement en argent de filons au contact des veines kaolinisées, c'est-à-dire altérées, simplement parce que ces veines avaient servi de chemins à l'altération des minerais filoniens.

au Mexique et dans l'Amérique du Sud, une régularité presque théorique : au Mexique notamment, où la plupart des anciennes grandes mines à minerais riches et directement amalgamables exploitent aujourd'hui plus profondément des sulfures complexes¹.

A Taxco (Guerrero), on a eu beaucoup d'argent jusqu'à 300 m., puis de la blende noire et un peu de galène avec faible teneur en argent. Ailleurs, au Mexique, quand ont disparu les minéraux d'argent, on trouve souvent du quartz ou de la calcite sans aucun argent, ou du mispickel [Zacualpan (Mexico); Mapimi et Velardena (Durango)]. Nous renvoyons également à ce que nous dirons du gîte de Chañarcillo au Pérou.

Il est possible aussi qu'il faille voir une autre application du même principe dans ces veines riches en argent, qui, sur beaucoup de champs de filons métallifères, ont été considérées autrefois comme des venues postérieures à un remplissage plombeux plus pauvre et qui peuvent être souvent le résultat d'une concentration, opérée sur ces venues anciennes par une circulation d'eaux descendantes ou ascendantes dans des fissures qui les ont rencontrées. C'est une question intéressante que nous discuterons au chapitre de l'argent.

Fréquemment, ces minerais, ainsi enrichis en argent, sont associés avec du manganèse, ou avec du cobalt : deux métaux, qui tendent également à se concentrer dans les mêmes conditions, l'un par rapport au fer, l'autre par rapport au nickel, avec lesquels ils peuvent se trouver plus profondément mélangés. Souvent aussi, on a constaté, sur des affleurements, la présence de barytines argentifères, alors que j'ai déjà signalé la concentration superficielle de la baryte.

Le cas du *cuivre* est également très net.

On commence, dans la zone d'oxydation, par de l'oxyde ou des carbonates de cuivre, accompagnés parfois de cuivre natif, si des actions réductrices ont pu intervenir, soit au contact des matières organiques, soit par l'action de grains de magnétite, comme on a supposé que cela s'était passé au Lac Supérieur. Ces minerais sont associés avec les oxydes de fer, par rapport auxquels ils sont en faible proportion, si un milieu calcaire n'intervient pas, bien que leurs teintes bleues et vertes les fassent aussitôt reconnaître.

En milieu calcaire, les carbonates, azurite et malachite, se développent, accompagnant les produits de la décalcification du calcaire, c'est-à-dire des argiles rouges, dans lesquelles on peut trouver aussi de la calamine (terres calaminaires).

Puis on passe à la zone de cémentation, où apparaissent les minerais de cuivre sulfo-antimoniés ou sulfo-arséniés, comme les argents noirs et les argents rouges, quand il s'agit d'un filon d'argent. Là se montrent, avec les cuivres gris, les chalcosines, les phillipsites, etc. En même temps, le fer peut, si l'on est en terrain calcaire, avoir donné de la sidérose : d'où le groupement classique, sidérose et cuivre gris.

¹ Cette zone de cémentation très nette a été plutôt expliquée comme un effet d'action dissolvante exercée de bas en haut dans le phénomène filonien lui-même. Voir 1906. VILLARELLO. *Sur le remplissage de quelques gisements métallifères* (Cong. de Mexico, 533).

Au-dessous enfin, on arrive à la zone des pyrites cuivreuses inaltérées.

Pour le *fer*, les phénomènes peuvent également s'énoncer d'une façon très théorique. La forme stable est le sesquioxyde, qui tend à se réaliser par l'altération de toutes les combinaisons originelles ou momentanées, tant qu'une action réductrice calorifique n'intervient pas. Ce sesquioxyde peut se produire directement aux dépens de la pyrite de fer en terrain inattaquable aux acides, ou par l'intermédiaire de la sidérose, si l'on est en terrain calcaire ; il peut aussi provenir d'un dépôt originel de sidérose, soit filonien, soit sédimentaire ; enfin, il résulte parfois de la suroxydation de la magnétite, qui peut exister en profondeur, soit dans les roches cristallines, soit dans les sédiments métamorphisés. Mais il est rare que le sesquioxyde soit lui-même la forme originelle, quoique le cas se présente assurément, ne fût-ce que dans les produits de fumerolles volcaniques, ou dans les dépôts des eaux superficielles.

On constate des exemples nombreux d'oxydes de fer passant en profondeur à des carbonates, par exemple pour les gites de métamorphisme en terrain calcaire, comme Bilbao, la Styrie, certaines mines pyrénéennes, etc., ou encore pour les dépôts oolithiques, qui sont une des formes les plus fréquentes de sédiments ferrugineux (Saint-Rémy en Calvados).

On observe également, dans une zone montagneuse, comme celle des Pyrénées, où les gites sont pour la plupart filoniens, le passage fréquent des oxydes aux pyrites, avec ou sans passage par l'intermédiaire des carbonates, suivant que l'on est ou non en terrain calcaire. Ce n'est pas pour une autre raison que les gites les plus purs en soufre, formés d'oxydes de fer riches, s'y trouvent à des altitudes qui en rendent l'extraction presque impossible ; plus bas dans la montagne, on a, en bien des points, des carbonates, plus ou moins oxydés à la surface ; et enfin, quand on arrive au niveau des vallées actuelles, c'est-à-dire quand on passe au-dessous du niveau hydrostatique, on voit, toutes les fois qu'on tente une recherche, le minerai de fer sali par du soufre et parfois par des métaux étrangers (plomb, zinc, etc.), qui sont le premier indice d'un gîte sulfuré complexe.

Des considérations industrielles font, généralement, que l'on s'arrête dans l'exploration d'un minerai de fer, dès qu'il devient sulfureux et que, rarement, on passe, en pratique, du carbonate à la pyrite ; mais cela se produit quand le minerai complexe renferme assez de plomb, de zinc ou de cuivre pour que ces métaux soient utilisables, le fer n'étant plus qu'un produit accessoire. On descend alors souvent dans la zone, où la pyrite s'associe avec la galène, la blende ou la chalcopryrite.

S'il fallait, d'ailleurs, une preuve de cette origine métamorphique pour ces grands amas de carbonate de fer à allure filonienne et disposés à l'état de brèche dont les noyaux sont restés calcaires, il suffirait de remarquer que tous ces gisements sont dans les calcaires, tandis que tous les grands amas de sulfure de fer, recouverts eux-mêmes par un chapeau de fer oxydé, sont dans les schistes.

Cette altération des minerais de fer a eu, lorsque le minerai primitif était phosphoreux, une influence notable sur la teneur en phosphore, qui

joue un si grand rôle en métallurgie¹. Les minerais filoniens à origine sulfureuse sont très rarement phosphoreux ; et les oxydes, ou carbonates, qui en proviennent, sont donc ordinairement d'une remarquable pureté en phosphore. Ces sortes de carbonates, plus ou moins peroxydés, qui ont, en outre, l'avantage de s'être trouvés épurés en soufre, ont, dès lors, formé quelques-uns des meilleurs minerais à acier Bessemer.

Au contraire, les sédiments carbonatés oolithiques ou hydroxydés sont tous plus ou moins phosphoreux : le phosphate de chaux ayant dû se concentrer et se précipiter par les mêmes réactions, qui faisaient précipiter le sel de fer ; mais, ensuite, les actions d'altération superficielle ou de métamorphisme calorifique ont eu, habituellement, un effet épurant, surtout en milieu calcaire et ont pu arriver à donner des minerais relativement purs avec des minerais qui étaient d'abord phosphoreux. Ces minerais sédimentaires se sont souvent d'autant plus épurés en phosphore qu'ils sont d'un âge plus avancé.

Pour le *plomb*, j'ai dit que, les sels étant peu solubles, l'altération était d'ordinaire réduite au minimum. J. Roth, qui a fait des expériences sur la solubilité des sulfates divers, a montré que 100 parties d'eau dissolvent :

A 11° C. . . .	0,004383	} parties de sulfate de plomb.
A 13° C. . . .	0,003155	
A 12° C. . . .	21.300	} parties de sulfate de fer.
A 41° C. . . .	41.300	
		} parties de sulfate de zinc.

L'argent est intermédiaire entre le plomb et le fer.

Cependant un peu de sulfate de plomb dissous a pu être transformé en carbonate par des solutions de carbonates alcalins ou de carbonate de chaux, en présence de l'air et d'un terrain calcaire. 100 parties de sulfures de plomb, en poids, produisent 126,78 de sulfate et 111,71 de carbonate : l'accroissement de volume du sulfure au carbonate étant de 28,13 p. 100.

Il s'est ainsi développé de la cérusite, qui forme souvent un sable cristallin, dans lequel peuvent apparaître des produits colorés, tenant à des traces de phosphore, d'arsenic, de molybdène, qu'auraient contenues le filon ou qu'y aurait introduites l'action des zones voisines, notamment le phosphore fréquemment contenu dans les calcaires encaissants², c'est-à-dire des pyromorphites, mimétèses et wulfénites. On peut citer de nombreux cas, où la mimétèse arrive à former un minerai, sans doute parce que le gîte primitif contenait du mispickel et ces minerais sont alors volontiers aurifères, comme le sont fréquemment les mispickels eux-mêmes. Il existe également des gisements superficiels, tenant cérusite, sidérose et cinabre, qui proviennent d'une association sulfurée du plomb, du fer et du mercure.

Parfois aussi le sel de plomb soluble peut, sous une action réductrice, être amené à reprécipiter de la galène (sur des boisages, des outils de fer, des ossements), en sorte que cette galène, malgré son insolubilité, semble avoir été transportée par remise en mouvement d'un point à l'autre.

¹ Voir Comptes Rendus, 25 juin 1904. L. DE LAUNAY. *Sur l'association géologique du fer et du phosphore et la déphosphoration des minerais de fer en métallurgie naturelle.* Voir également : *ibid.*, 29 mars 1897. *Sur la forme profonde des amas filoniens de fer.*

² En Derbyshire, à Golden Valley, le phosphate disparaît au-dessous de 45 m.

L'altération possible du sulfure de plomb en carbonate, même sans intervention de calcaires, est un fait nettement mis en évidence par l'existence fréquente, dans de vieilles haldes de mines, de fragments de galène transformés partiellement ou totalement, suivant leurs dimensions, en cérusite ; on a pu le constater par exemple, en Derbyshire, sur des haldes remontant, d'après certaines inscriptions, à l'empereur Hadrien (vers 130).

De même pour le *zinc*, nous avons vu que le gîte superficiel était un gîte

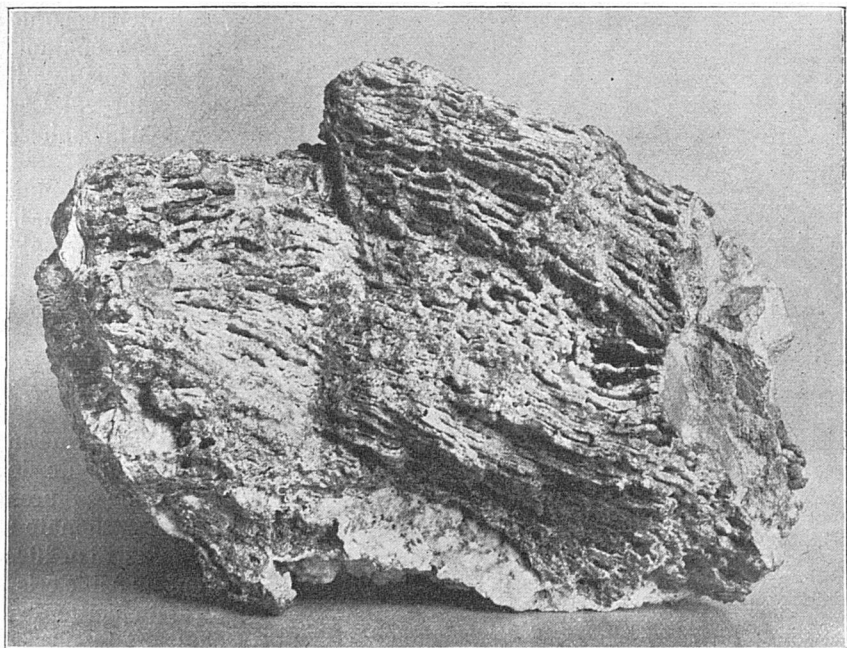


Fig. 13. — Exemple de calamine blanche concrétionnée du Djebel Youssef (Algérie).

calaminaire, très peu développé en milieu inerte, très important en terrain calcaire. Ce cas, sur lequel il ne semble plus possible de discuter, sera examiné en détail au chapitre du zinc. La calamine commence, d'habitude, par être rouge et mélangée de terres calaminaires, puis peut devenir blanche et enfin se transformer en blende ; mais ces passages se font avec toute l'irrégularité que comporte la circulation des eaux en terrains fissurés et, souvent même, une circulation par rivières souterraines, ou véritables grottes.

La disparition de cette calamine pour faire place à la blende se produit à des profondeurs très variables, comme la position du niveau hydrostatique lui-même : 18 m. à Austin en Virginie, 50 à 100 m. en Belgique, 150 m. au maximum en Prusse Rhénane, 50 m. à la mine Cécile en Silésie. La figure 13 montre les formes concrétionnées que peut prendre en pareil cas la calamine.

Pour le *manganèse*, on constate toujours une disparition en profondeur. Le minerai de manganèse paraît se transformer en un minerai de fer, quand on s'enfonce. Il semble n'exister de minerai riche manganésifère que dans la zone d'altération, parce que l'altération simultanée du fer et du manganèse détermine un enrichissement relatif en manganèse. Ces minerais superficiels tendent alors à donner de la pyrolusite et, souvent, une concentration connexe, que j'ai déjà signalée pour la baryte, amène la combinaison des deux substances sous la forme très fréquente de la psilomélane.

Plus bas, dans la zone de cémentation, en terrain calcaire, on peut rencontrer des carbonates de manganèse, qui, eux-mêmes, disparaissent en profondeur. Puis le fer, éliminé dans les parties hautes, reprend la prédominance.

De même, pour le *nickel*, les altérations de péridotites nickelifères, source première de tous les gîtes de la Nouvelle-Calédonie, ont pris, par concentration secondaire, la forme de silicates enrichis, en même temps que le manganèse et le cobalt, concentrés à la fois, donnaient ces boules d'oxydes noirs, auxquels les mineurs donnent le nom de truffes. Il y a, en effet, concentration du cobalt, par rapport au nickel, comme du manganèse par rapport au fer, de la magnésic par rapport à la chaux, de la potasse par rapport à la soude.

Les altérations ont été parfois si récentes, que des insectes actuels se sont trouvés englobés dans la garniérite en stalactites sur d'anciens travaux souterrains de Nouvelle-Calédonie.

Le cas de l'*étain* est plus imprévu, l'oxyde d'étain paraissant d'abord tout à fait insoluble. Cependant, on sait déjà chimiquement que la cassitérite se dissout dans un certain nombre de cas, où l'oxyde stannique résiste; pratiquement, diverses observations semblent bien montrer un déplacement superficiel de ce corps par voie chimique. Nous citerons, à ce propos, les affleurements de filons boliviens, les noyaux de cassitérite concrétionnés de Tepezala au Mexique, les filons de calcite secondaire avec cassitérite disséminée de Waterberg au Transvaal, enfin les bois de cerf imprégnés de cassitérite de Pentervan au Cornwall (pour lesquels on a, il est vrai, parlé d'une introduction mécanique). Le minerai d'étain concrétionné, dit étain de bois, semble, en particulier, localisé dans les parties hautes de filons.

Pour l'*antimoine*, nous avons encore formation superficielle d'oxydes (sénarmontite, valentinite) au-dessus des gîtes d'antimoine et quelquefois il paraît même y avoir eu remise en mouvement de stibine.

Tous les faits que nous venons d'énumérer tiennent à des dissolutions chimiques.

Dans certains cas, sur des sables, graviers, conglomérats, la circulation des eaux descendantes paraît avoir été accompagnée, en outre, de phénomènes mécaniques. C'est un point que nous traiterons à propos des placers. Nous verrons alors que, dans les graviers aurifères, on a pu supposer parfois une descente progressive des grains d'or, tendant, par cet entraînement, à venir se concentrer vers la base de la formation, où, en fait, on les trouve toujours accumulés.

2° GISEMENTS PRODUITS PAR DÉPLACEMENT. — INTERVENTION DE LA SPÉLÉOLOGIE ANCIENNE OU RÉCENTE

Dans l'étude précédente, nous avons supposé implicitement que la réprécipitation des métaux dissous s'était opérée presque sur place, tout au moins dans le gisement même auquel les minerais avaient été empruntés. Il arrive parfois que le déplacement produit par les eaux souterraines soit plus accentué et qu'il en résulte la formation d'un gîte nouveau sur un point qui, au début, n'était pas métallisé.

Ce phénomène a produit assez souvent, dans des conditions très instructives, des redépôts de minerais dans des vides creusés artificiellement pour l'exploitation même des minerais primitifs. La remise en mouvement n'est pas contestable quand on trouve des dépôts de galène sur des outils de fer romains, des minerais de cuivre sur d'anciens boisages, du cinabre dans un crâne préhistorique, des minerais divers réalisés synthétiquement sur des objets ou des monnaies de l'époque romaine tombés dans une source thermale. On peut étendre la même conclusion à toute une catégorie de gites encaissés dans les terrains calcaires, où de semblables remises en mouvement ont réussi à incruster des parois de grottes récentes en englobant des os d'animaux appartenant à la faune actuelle. Nous décrirons de très beaux exemples de ces grottes creusées le long d'un gîte métallifère plombo-zincifère et incrustées par des minerais empruntés au gîte voisin. Pour nous, beaucoup des gisements dits remplissages de grottes n'ont pas une autre origine. Il est cependant possible que des grottes aient parfois préexisté à la métallisation, comme nous l'avons déjà dit¹ : soit grottes creusées par les eaux ascendantes à acide carbonique, soit grottes de la zone superficielle, telles que celles où nous pénétrons dans nos explorations².

3° CONSTITUTION DE GISEMENTS NOUVEAUX PAR VOIE D'ALTERATION SUPERFICIELLE

Le phénomène, que nous allons étudier ici et auquel nous attribuerons un rôle dans la formation de certains gisements minéraux ou métallifères particuliers, est celui que l'on a voulu généraliser dans les théories de sécrétion latérale ou de formation *per descensum*. Nous avons assez dit que nous ne lui attribuons nullement ce caractère de généralité. Il n'en est pas moins d'un haut intérêt théorique et pratique dans une foule de cas.

Nous laisserons de côté, l'ayant étudié ailleurs³, ce qui est relatif à l'altération normale des roches et sédiments. Il convient néanmoins de rappeler, comme constituant de véritables minerais ou minéraux utilisables, les cas d'altération spéciale qui ont porté : sur des granulites très

¹ Page 119.

² De semblables grottes anciennes ont, par exemple, été étudiées par VAN DEN BROEK, MARTEL et RAHIR. *Les cavernes et les rivières souterraines de la Belgique* (2 vol. 1910).

³ *Science géologique*, page 308.

feldspathiques en produisant du kaolin ; sur des roches feldspathiques pénétrées de veines pyriteuses en donnant de l'alunite ou de l'alun, sur des roches magnésiennes, serpentines, etc., en formant du carbonate de magnésie, du talc, de l'écume de mer. Tous ces cas seront examinés plus tard en détail à propos de chacune de ces substances. Notons également que l'effet habituel de ces altérations est d'accentuer la teneur en potasse par rapport à la soude, en magnésie, baryte ou strontiane par rapport à la chaux. Je me bornerai à examiner ici quelques points spéciaux et bien caractéristiques de notre sujet, comme la latéritisation qui comporte des formations de bauxites et de minerais de fer, puis le cas des fers en grains et phosphorites, celui des oxydes de manganèse, des minerais de nickel, etc., et je discuterai en terminant, à ce propos, la possibilité que des secrétions latérales ou des réactions aqueuses descendantes aient constitué de véritables gîtes plombo-zincifères.

A) LATÉRITISATION

La décomposition sur place de roches cristallines dans tous les pays tropicaux (Guyane, Sénégal, Madagascar, etc.) donne des produits de couleur rouge, généralement connus sous le nom de *latérites*, qui, d'après une étude de A. Lacroix, sont un mélange d'hydroxydes d'alumine et de fer.

Ainsi que l'ont précisé par des analyses Chautard et P. Lemoine, l'altération superficielle de certaines roches feldspathiques peut prendre des types entièrement différents suivant que les réactions se produisent dans la zone tropicale ou dans la zone tempérée (certaines influences biologiques pouvant intervenir, dans des conditions qui n'ont pas été encore éclaircies) ¹.

Dans nos pays tempérés, la décomposition des feldspaths donne, en principe, des silicates d'alumine, où la silice reste en combinaison : des argiles et des kaolins, dont la composition diffère surtout de celle des feldspaths primitifs par l'élimination des alcalis, de la chaux ou de la baryte, sans qu'il y ait grande différence en ce qui concerne la silice et l'alumine. Les silicates ferro-magnésiens donnent également des argiles par élimination des mêmes bases et augmentation relative du fer, mais sans isolement de l'alumine.

Cette décomposition kaolineuse est celle qui se produit, même sous la zone tropicale, pour les schistes, phyllades, et probablement pour une grande partie des granites ou des gneiss. Au contraire, dans ces pays chauds, les roches basiques magnésiennes, telles que les diabases, péridotites, serpentines, basaltes, les laves basiques, etc., subissent une décomposition toute différente, essentiellement caractérisée par la séparation immédiate de la silice et de l'alumine, avec mise en liberté de ces deux éléments, sans passage nécessaire par l'argile.

¹ 1909. CHAUTARD et LEMOINE. *La latéritisation* (Bull. Soc. Ind. Min., 4^e sér., t. 9). — Cf. HOLLAND. *On the constitution, origin and deshydration of indian laterite* (Geol. Mag., 4, t. 10, 1903, p. 59 et 154), le dernier travail avec F. WARTH. — 1909. D^r ERNEST FLEURY. *Le siderolithique suisse. Contribution à la connaissance des phénomènes d'altération superficielle des sédiments* (Fribourg, thèse de doctorat, 262 p.).

La conséquence est un appauvrissement en silice, cette substance se trouvant en partie dissoute et entraînée et, au contraire, un enrichissement très net en alumine, en même temps que la décomposition des silicates ferro-magnésiens donne, par uralitisation puis départ de la magnésie soluble, un excès de fer, manganèse, titane, chrome, etc. L'acide phosphorique, lui, est entraîné avec les parties solubles. Une diabase qui entre en décomposition aura perdu près de moitié de sa silice. En revanche, le fer a triplé et est passé en sesquioxyde, le titane a plus que doublé ; l'alumine est passée de 16 à 28 p. 100. Quand les réactions sont achevées et ont donné une latérite proprement dite, on atteint 46 p. 100 d'alumine et la silice tombe de 52 à 17, dont 3 seulement demeurent combinés. Pour une teneur initiale de 7 p. 100 en fer métal, on arrive à 22 p. 100. Il peut ainsi se former des minerais d'aluminium, de fer, de manganèse, de cobalt et, en même temps, s'isoler et se concentrer parfois des minerais d'or.

Naturellement, la structure de la roche, en permettant la pénétration plus ou moins facile des réactifs chimiques, rend la décomposition elle-même plus ou moins prompte et les roches fines perdent moins vite leur silice que les autres.

Dans certains cas, on peut suivre au microscope les phases successives de l'altération et la latérite peut conserver la structure de la roche initiale ; ailleurs, cette structure a complètement disparu et l'on se trouve en présence de masses compactes et épaisses, avec parties concrétionnées ou pisolithiques. Diverses circonstances originelles ou secondaires, sur lesquelles je vais revenir, peuvent faire varier considérablement la proportion relative des deux éléments constituants, c'est-à-dire l'alumine et le fer. Ainsi apparaissent : d'une part, les *bauxites* qui sont des hydrates d'alumine, avec parfois une certaine teneur en fer, aboutissant à des bauxites blanches très pures (dép. du Var) à composition de diaspore (85 p. 100 d'alumine et 15 p. 100 d'eau) ; de l'autre, des *minerais de fer en grains*, qui eux-mêmes présentent parfois des types très alumineux. On a tous les passages entre ces trois types : latérites, bauxites, minerais de fer en grains. La décomposition des calcaires donne des produits très analogues.

Cette assimilation, qui a été très discutée, suppose que les bauxites ou les minerais de fer en grains sont le résidu d'une attaque opérée sur des roches diverses pendant une période d'émersion continentale, laissant d'ailleurs indéterminées la nature et l'origine des agents chimiques qui ont pu rendre cette attaque particulièrement intense.

En remontant l'histoire géologique, pour commencer par les cas les plus nets et les plus récents, nous voyons sur de très vastes plateaux (Madagascar, Guyane, etc.), des latérites, dont la formation, commencée à une date indéterminée, se continue peut-être encore.

On doit attribuer un âge plus ancien aux latérites étudiées par Augé dans le Plateau Central auprès de Madriat, latérites qui renferment 47 p. 100 d'alumine soluble dans les alcalis et qui se sont visiblement formées aux dépens des gneiss. D'après Giraud, ces latérites, lorsqu'on les trouve dans leurs gisements primilifs, sont recouvertes par les argiles sableuses de l'oligocène qui en renferment des galets. Elles correspondent donc à

peu près à cette époque marquée dans une grande partie de la France par de si fréquentes et si abondantes concentrations de fer qu'on l'a appelée l'époque sidérolithique ; elles sont à peu près contemporaines des fers en grains du Berry dont nous allons reparler et des arkoses à noyaux pisolithiques qui les accompagnent dans la vallée du Cher, contemporaines aussi des remplissages phosphatés du Quercy, dont l'assimilation tectonique avec les minerais du Berry est si caractérisée, contemporaines enfin très probablement de beaucoup des creusements de cavités souterraines, grottes, abîmes, avens, etc., qui, dans toute la région des Causses, présentent, sans remplissage extérieur, l'équivalent des poches du Berry ou du Quercy à remplissage ferrugineux ou phosphaté. Elles se sont, en résumé, constituées dans une période où l'action dissolvante et érosive des eaux superficielles et souterraines a atteint certainement un véritable paroxysme.

Remontant plus loin encore, nous voyons qu'en Provence les bauxites correspondent à une lacune (peut-être à une période d'émersion) marquée par l'absence de l'aptien supérieur et de l'albien ¹. Celles-ci, comme les minerais de fer du Berry, reposent, non sur des roches cristallines, mais sur des calcaires. Si l'on ne suppose pas un transport qui, en général, ne paraît pas avoir été très accentué pour ce genre de formation, on aurait donc un produit d'altération des calcaires, analogue aux poches d'argile de la craie ou aux argiles rouges des grottes. Cela correspond avec l'absence ordinaire des grains de quartz, qui existent, au contraire, dans la latérite de Madriat : la silice de la bauxite paraissant former un silicate d'alumine hydraté de composition inconnue.

Ce qui s'est passé ainsi dans quelques périodes récentes, pour lesquelles nous avons des moyens d'appréciation faciles, a dû certainement avoir lieu à diverses époques antérieures depuis les périodes les plus reculées du globe et peut-être avec d'autant plus d'intensité au début que l'abondance du fer pouvait être particulièrement grande alors qu'une croûte moins épaisse séparait la surface du noyau interne.

B) MINÉRAIS DE FER EN GRAINS ET PHOSPHORITES

Le cas des minerais de fer en grains et celui des phosphorites, qui seront examinés plus tard en détail, se rapportent tous deux, quoiqu'ayant constitué des gisements très différents, à des phénomènes connexes dus à des réactions anciennes continentales.

Dans les deux cas, des cavités, ayant l'allure des grottes actuelles, ont été remplies, par en haut, de produits venant du jour sous forme de dissolutions et accompagnés parfois de quelques matériaux détritiques. Il y a eu remplissage de grotte, soit par incrustation de phosphate, soit par dépôt d'une argile à minerais de fer ; et souvent, ce qui concorde avec le caractère superficiel attribué au remplissage, du manganèse s'y est développé en même temps.

¹ Voir au chapitre de l'aluminium, tome 2.

Quand nous étudierons les fers en grains du Berry, nous les verrons occuper, sous le calcaire lacustre de Brie, des poches de décalcification superficielle, ou vides, ou remplies d'un résidu argileux et présentant les formes ordinaires de toutes les cavités creusées dans les profondeurs des Causses par les eaux circulant le long des diaclases. Il a dû y avoir là apport d'eaux, chargées de fer par leur circulation au contact de terrains supérieurs plus tard disparus et concentration de ce fer par voie descendante dans des cavités fermées à la base, ou plutôt reliées, comme cela se passe pour les avens, par de minces fissures impénétrables, à des points d'épanchement lointains. On trouve de même, dans la vallée de la Lahn, des veines ferrifères encaissées dans les tufs diabasiques et provenant de leur altération.

Le cas des phosphorites du Quercy est tout à fait analogue. Dans des cavités ayant la même allure, des dépôts de phosphate concrétionné ont été produits par des eaux venant de la surface et apportant des solutions phosphatées, qui se sont reprecipitées quand l'acide carbonique s'est dégagé.

Certains gites de phosphates, qui ont ailleurs une apparence un peu différente de poches plus superficielles, s'associent, dans le Nassau, avec des minerais de manganèse.

C) EXSUDATIONS DE MANGANÈSE

Un des cas où il se produit le plus nettement une exsudation du métal disséminé dans les roches et terrains et arrivant à constituer un véritable gisement est celui du manganèse. Des traces infimes de ce corps peuvent, dans l'altération des roches par les eaux de pluie, arriver à constituer des enduits bioxydés. J'en ai signalé¹ un cas particulièrement net, où des granulites utilisées pour empierrement, granulites qui, à l'analyse, contenaient seulement 0,3 p. 100 de manganèse, s'étaient, en quelques mois, entièrement couvertes d'un enduit manganésifère sur toutes leurs faces artificielles. Là, on ne pouvait supposer, comme on l'a fait parfois ailleurs, un apport extérieur du métal. De même, toutes les argiles superficielles arrivant à contenir des boules noires où le manganèse s'est rassemblé. Un phénomène du même genre doit être la cause des nodules manganésifères rencontrés dans les fonds marins, où finit par s'accumuler tout le métal. d'abord englobé en faibles proportions dans les laves pulvérisées et réduites en sable, etc.

On peut donc admettre qu'il y a fuite de tout le manganèse compris à l'intérieur d'une roche soumise à des réactions capillaires par porosité et que ce manganèse arrive peu à peu au dehors. Cette réaction, liée au voisinage de la surface, a pu s'accompagner, dans les gites métallifères, d'une fuite analogue où le sulfure de manganèse, momentanément précipité, se serait aussitôt remis en mouvement pour aller se déposer plus haut à l'état d'oxyde lorsqu'il aurait rencontré des actions oxydantes de la surface. Toutes ces observations tendent à faire admettre, pour le manganèse, la probabilité que de véritables gisements se soient constitués

¹ B. S. G. F., 4 déc. 1910.

par une sorte de sécrétion latérale. C'est tout au moins l'explication la plus plausible de la disparition à peu près constante du manganèse en profondeur, sur laquelle nous insisterons dans de nombreux exemples.

D) MINÉRAIS DE NICKEL OU DE COBALT

La forme, sous laquelle on exploite les minerais de nickel et cobalt en Nouvelle-Calédonie, est un cas tout à fait typique de gisements riches produits par l'altération superficielle et la sécrétion latérale de traces métallifères sans valeur, disséminées dans des serpentines. La description détaillée que nous donnerons de ces gisements les montrera limités en profondeur et formés par voie descendante dans des réactions de surface.

E) GISEMENTS PLOMBO-ZINCIFÈRES

A diverses reprises et sous bien des formes, on a émis l'idée que des gîtes plombo-zincifères, en particulier ceux encaissés dans les calcaires, avaient été produits par simple concentration récente de traces métalliques, disséminées d'abord dans les terrains encaissants, sous-jacents ou superposés. Cette théorie, qui se présente avec diverses variantes, revient toujours à éliminer l'influence directe des phénomènes ignés, des roches et des fumerolles que nous avons envisagée plus haut et à ne faire intervenir qu'une dissémination des métaux, d'abord presque infinitésimale, mais ultérieurement concentrée par les eaux de surface. C'est ce que nous venons d'admettre dans certains cas pour le fer, le manganèse, etc. Comme on a, à diverses reprises, constaté la présence d'un peu de zinc dans des calcaires, on en a conclu que ce qui s'était passé pour le manganèse avait pu aussi bien se réaliser pour le zinc. A notre avis, les phénomènes invoqués sont possibles, mais à la condition que le métal ait préexisté dans un véritable gisement : ce qui les réduit à des remises en mouvement.

Dans la théorie toute simple de la sécrétion latérale (Farcy, Wallace, Sandberger, etc.), il est admis que certaines strates ou certaines roches, d'abord imprégnées de métaux, ont cédé ceux-ci à l'action des eaux souterraines qui les ont redéposés en les accumulant dans des fissures des mêmes strates ou roches. Cette théorie a, par exemple, été proposée pour des gîtes plombo-zincifères encaissés dans certaines strates de calcaire dit métallifère, avec stérilisation des fissures dans les terrains voisins.

On lui a fait une objection plus spécieuse que réelle. On s'est demandé pourquoi une eau aurait commencé par dissoudre des éléments épars dans la roche pour les redéposer ensuite dans des fissures situées au même niveau, à la même température et à la même pression. C'est oublier que la simple dimension des vides peut entraîner, par exemple, le dégagement de l'acide carbonique en excès, comme on le constate chaque jour pour la formation des stalactites, qui est un cas de sécrétion latérale élémentaire. D'ailleurs, il est évident que la circulation des eaux

souterraines ne se borne pas à une seule strate. On a donc été vite amené à supposer que le mouvement des eaux avait pu, tout en entraînant les mêmes effets, être ascendant ou descendant.

Nous rencontrerons la théorie ascendante proposée par van Hise et Bain pour les gîtes du Haut Mississippi, où ils ont imaginé des eaux artésiennes emprisonnées dans des fissures calcaires sous un couvercle de schistes et amenées, par l'intervention de matières hydrocarburées, à y précipiter les métaux, pris d'abord dans les terrains encaissants.

Enfin, toujours pour le même groupe de gisements encaissés dans des calcaires et généralement pour les gîtes qui semblent se coincer à une profondeur restreinte, on a encore proposé une pénétration descendante d'eaux alimentées dans les terrains superposés. Lodin, pour les gîtes du Derbyshire, a invoqué le couvercle de terrain houiller, qui aurait fourni des eaux chargées d'acide sulfhydrique par la rencontre de pyrites en milieu réducteur¹. Ces eaux, après avoir dissous les métaux dont, dans toutes ces théories, on suppose la présence à l'état de traces, seraient arrivées en descendant dans des fissures, ou vides, ou remplies d'eau et y auraient produit, dans le premier cas, des stalactites ; dans le second, par diffusion, des dépôts lents et concrétionnés à la façon des remplissages filoniens ordinaires.

Dans d'autres cas, P. Termier a pensé qu'une lame de charriage disparue avait pu fournir, par simple pénétration descendante, certains minerais tunisiens, supposés sans racine profonde et, en réalité, suivant lui, empruntés à des terrains supérieurs aujourd'hui disparus.

Des pénétrations descendantes postérieures à la métallisation ont été souvent constatées d'une façon directe dans des filons. Ainsi, dans le Derbyshire, il a pénétré, dans les filons plombifères, des fragments houillers et même liasiques. De même, dans les filons de cobalt de la mine Segengottes de l'Erzgebirge Bohémien, on a rencontré, à 140 m. de profondeur, une portion de filon remplacée sur 6 m. de long et 0,60 m. de large par des galets et sables fluviaux. A la mine Diepenbrock, près Mulheim, sur la Ruhr, un filon de quartz à BGP a été également remplacé, à 30 m. de profondeur, par une masse de galets (grauwacke, schiste argileux, débris du filon lui-même) évidemment arrivés d'en haut².

4° CONSERVATION D'ALTÉRATIONS SUPERFICIELLES ANCIENNES

A toutes les époques de l'histoire géologique, il a dû se produire des phénomènes d'altération continentale analogues à ceux que nous observons pour la période actuelle. On a dû avoir des filons affleurant à la surface et oxydés ou cimentés par les eaux descendantes, des latéritisations, des kaolinisations, des sécrétions latérales, des formations de phosphates, de minerais de fer en grains, etc. On ne voit pas de raison pour que ces phénomènes aient été différents autrefois de ce qu'ils sont aujourd'hui, au moins depuis le moment où l'apparition d'animaux à

¹ *Métallurgie du zinc*. Passim.

² БРСК. *Loc. cit.*, t. 2, 43.

respiration aérienne et le développement de la végétation terrestre nous indiquent un milieu extérieur oxydant analogue au nôtre et renfermant au moins autant d'acide carbonique. Si toutes ces altérations anciennes n'avaient pas été détruites, on devrait donc, dans les gîtes métallifères anciens, en retrouver l'indice; et, tout en comprenant que, par leur caractère superficiel, elles aient été particulièrement vouées à la destruction, on doit s'attendre à ce qu'ici ou là certaines circonstances favorables nous aient conservé quelque chose de semblable. La première de ces circonstances, à laquelle on songe, est un enfouissement analogue à celui qui nous a conservé les ruines de villes antiques: enfouissement produit ici par la descente d'un compartiment du sol dans un mouvement tectonique.

Ayant ainsi conçu la possibilité du phénomène, on est, d'autre part, frappé de rencontrer, dans un certain nombre de cas, jusqu'à des profondeurs très notables, certaines formes de minerais que, dans la majeure partie des autres gisements, on s'était habitué à considérer comme superficielles: minéraux hydratés, oxydés, carbonatés, ou parfois natifs. Le rapprochement des deux idées conduit à une hypothèse, qui peut paraître singulièrement aventureuse et même inutile dans tel ou tel cas particulier, mais qui n'en a pas moins des chances pour s'être trouvée parfois exacte: celle d'une altération superficielle ancienne ayant provoqué des phénomènes aujourd'hui constatables à de grandes profondeurs.

Revenons, par exemple, pour faire comprendre notre pensée, sur le cas, assez facile à étudier en Europe, des filons hercyniens, que nous avons déjà considéré¹ à l'occasion des mouvements verticaux ultérieurs vers le haut ou vers le bas, auxquels les filons ont pu être soumis après le remplissage.

Contrairement à une idée très répandue, suivant laquelle l'âge des filons métallifères serait presque toujours indéterminable, nous verrons qu'il existe toute une série de filons plombo-zincifères appartenant nettement à une venue hercynienne, sur lesquels, par conséquent, doivent se présenter aussi bien les conditions de dépôt primitives ayant pu caractériser cette période que les processus d'altération propres à une telle chaîne, depuis si longtemps soumise aux transformations superficielles. Il suffira, à ce propos, de citer: les filons du groupe de Linarès en Espagne, par-dessus lesquels s'étend une transgression triasique; ceux du Harz qu'a recouverts en partie la transgression permienne; ceux de Belgique par-dessus lesquels la transgression ne s'est faite qu'à l'époque crétacée; ceux de la chaîne pennine anglaise, etc. Dans plusieurs des massifs anciens appartenant à la même chaîne, il est vrai qu'on ne peut pas être aussi affirmatif, car on a la preuve de dislocations appartenant au système des mouvements tertiaires: dislocations en rapport plus ou moins direct avec les venues éruptives situées sur des fractures du même âge. Mais il n'en est pas moins possible de se faire une idée d'ensemble qui est la suivante.

A la suite des mouvements hercyniens, accompagnés d'intrusions éruptives et de métallisations connexes, il y a eu là une période d'érosion plus ou moins immédiate, pendant laquelle la chaîne s'est détruite et a fourni des sédiments détritiques aux bassins lacustres ou aux vallées

¹ Page 171.

fluviales situés sur ses bords. C'est alors que les filons métallifères, incrustés préalablement en profondeur, ont commencé à apparaître au jour dans des conditions dont on peut se faire une idée, notamment par les minerais situés dans les parties hautes de la chaîne des Andes. Ces filons ont dû subir alors, comme tous les terrains avoisinants, les métasomatoses caractéristiques des phases continentales et dont l'époque actuelle nous offre d'excellents spécimens : oxydation des parties hautes, cémentation et enrichissement des parties plus profondes, décalcifications, kaolinisations, productions de zéolithes, d'épidote, etc. Et ces phénomènes se sont continués pendant de très longues périodes jusqu'au moment où une transgression est venue recouvrir le tout d'un manteau protecteur et le mettre à l'abri d'une érosion, qui n'a pu recommencer que plus tard et d'une façon plus localisée, là où le creusement des vallées a réussi à enlever le manteau transgressif. L'état actuel dépend donc de l'état plus ancien dans lequel la transgression a retrouvé le continent sur laquelle elle a passé, et les filons d'âge hercynien, avec leur périphérie, nous conservent, là où ils n'ont pas été encore remaniés récemment, une image de ce qui pouvait exister au moment de cette transgression.

Si, à ce moment, le relief général du pays avait été le même qu'aujourd'hui, le niveau hydrostatique d'alors se confondant avec le niveau hydrostatique actuel, les altérations remontant à cette période se borneraient à fort peu de chose et passeraient même inaperçues. Le fait que la mer a pu revenir sur la région en question prouve qu'au moment où elle y a fait invasion, le pays avait été ramené au-dessous du niveau de la mer et, par conséquent, le niveau hydrostatique, à ce moment précis, devait être au-dessus de la superficie. Mais, pourquoi la mer est-elle revenue sur un continent émergé ? Ce n'est pas parce que le niveau de la mer s'est élevé comme dans une marée proprement dite. L'idée de tels mouvements dits eustatiques paraît être généralement abandonnée. C'est parce que le relief du continent s'est localement affaissé : ce qui a pu être préparé par l'érosion, mais ce qui implique pourtant nécessairement, comme terme final, un affaissement du continent, quel que soit d'ailleurs le genre de déformation, local ou général, dont cet affaissement relatif puisse provenir. La transgression marine a donc dû pénétrer sur un continent présentant encore certaines inégalités de relief et, dans les parties les plus hautes, certaines traces de formations et d'altérations continentales. En principe, là où il y avait un tel relief, si la transgression s'est faite par un progrès lent, elle a dû peu à peu ronger les saillies et c'est pourquoi le cas général est la disparition de telles saillies, la rareté de formations continentales, de grottes, de moraines glaciaires, de conglomérats fluviatiles, d'appareils volcaniques, d'altérations métallifères superficielles, etc. remontant à une époque ancienne. Généralement, le retour des eaux s'est traduit par un premier nivellement, dans lesquels les produits de la destruction des saillies ont servi d'abord à combler les dépressions restreintes avec des matériaux détritiques. Néanmoins il a pu et dû arriver parfois que le mouvement fut brusque, qu'une dénivellation soudaine par fracture, par effondrement, par faille, fit descendre un compartiment terrestre de 2 à 3000 m. et provoquât ainsi un retour des eaux, soit lacustres, soit marines, amenant au-dessus de

lui leur manteau protecteur. C'est dans de tels cas que l'on retrouve les formations continentales anciennes sous un recouvrement sédimentaire ; et l'on doit aussi s'attendre à observer alors les altérations métallifères anciennes. Les régions de horsts anciens, où nous voyons directement le contrecoup de mouvements postérieurs — par exemple, des cas comme celui de la Bohême, du Plateau Central, où se sont enfoncées des cuvettes tertiaires de 2 ou 3 000 m. de profondeur — ont dû, en même temps, amener des mouvements moins visibles, parce que plus généraux, auxquels nous sommes tentés d'attribuer un grand nombre d'anomalies métallogéniques.

Supposons encore, pour fixer les idées, que l'ancien géosynclinal, aujourd'hui occupé par la chaîne des Andes, subisse un jour un effondrement local, par suite duquel un de ses massifs les plus élevés se trouverait redescendu au-dessous du niveau de la mer. Les sédiments recouvriraient alors, enfouiraient en profondeur et protégeraient pour longtemps ce massif, tel qu'il nous apparaît dans les hautes régions andines, avec les effets très profonds d'une altération que facilitent le relief accidenté et l'abaissement connexe du niveau hydrostatique. Si, plus tard, ce massif enfoui se trouvait exhumé par un mouvement inverse, on verrait alors avec étonnement se continuer à de grandes profondeurs des formes de métallisation que nous sommes habitués à considérer comme localisées dans les zones hautes des chaînes.

Sans même invoquer des mouvements pareils, nous avons, un peu partout, sur les plates-formes les plus stables, la preuve de déplacements verticaux vers le bas et vers le haut, qui ont permis les accumulations de sédiments horizontaux, souvent avec de grandes épaisseurs, sur un plateau ancien. Ces dépôts marins impliquent parfois des retours de la mer successifs, séparés par des périodes d'émersion et chacun d'eux n'a pas nécessairement supprimé le relief antérieur avec ses effets continentaux.

Sous la transgression cénomaniennne qui a couvert le plateau primaire de l'Ardenne, de la Belgique, de la Prusse Rhénane, bien des indices nous perpétuent ainsi un état continental qui s'était prolongé pendant plusieurs périodes géologiques. Gosselet a pu y reconstituer un cirque glaciaire précrétacé. Ailleurs, nous avons des fissures dans lesquelles sont tombés les iguanodons du Bernissart. Et, en ce qui concerne les minerais, nous trouvons, selon toutes vraisemblances, dans les calamines de la Vieille-Montagne, de Welkenraedt, etc., les résultats d'une transformation déjà effectuée avant la fin du secondaire.

En partant de telles observations, il me paraît possible de proposer, pour bien des faits qui ont été interprétés, dans les champs de filons classiques, comme des récurrences (d'ailleurs possibles) de venues métallifères successives, une explication différente, fondée sur l'altération superficielle : une altération antérieure aux dernières transgressions.

Ainsi, à Schneeberg, nous verrons des géodes de calcite ultérieurement resiliçifiées et un arrêt général de la minéralisation en profondeur. A une époque ancienne, il a dû y avoir cémentation avec production de calcite et de barytine dans des géodes. Puis, longtemps après, par une réaction contraire, ces minéraux ont été pseudomorphosés en quartz et cornéenne. Quant à la disparition des minerais en profondeur, vers 4 à 500 m.,

on l'a, il est vrai, attribuée à la pénétration dans le granite, qui aurait joué un rôle génétique ; mais elle peut fort bien avoir une autre origine, d'autant plus que le chapeau d'oxydation classique, sur lequel tout le monde est d'accord, est descendu là jusqu'à 180 m.

J'ai déjà dit un mot de cette question très délicate à propos des gangues carbonatées. J'y reviendrai pour divers minerais, à propos desquels elle se pose spécialement : filons de sidérose, filons argentifères, etc. Elle se présente toutes les fois que nous voyons une substance disparaître quand on s'enfonce, ou encore quand nous trouvons, dans les profondeurs, un minerai que nous constatons ailleurs être propre aux affleurements. On pourrait aller très loin dans cette voie et se demander si des altérations venues d'en haut ne sont pas intervenues autrefois dans des gisements particulièrement profonds, comme ceux du Lac Supérieur, où l'on trouve, jusqu'aux limites actuelles de l'exploitation, du cuivre natif avec des minéraux prouvant une circulation d'eaux analogues aux eaux de surface (épidote, zéolites, calcite, etc.) Mais, comme nous le dirons à propos de ces gisements, rien ne prouve que la circulation aqueuse, dont, en toute hypothèse, on y constate l'effet, n'ait pas eu là une origine profonde.

5° TRANSFORMATIONS SOUS-MARINES ET SOUS-LACUSTRES DES SÉDIMENTS

Ce n'est pas seulement à la surface des continents ou dans la profondeur du sol que les terrains et minerais subissent des transformations. D'autres réactions peuvent encore agir sur les sédiments alors qu'ils sont encore recouverts par les eaux et leur faire subir des métasomatoses, qui, tout en étant postérieures à leur dépôt, comme leur examen permet parfois de le constater, ne se rattachent pas moins à la même phase, à la même période géologique. Certaines de ces réactions, malheureusement fort mal connues et étudiées encore, faute de pouvoir sonder à une profondeur suffisante dans les terrains qui occupent le fond des mers, sont constitutives de minerais.

Parmi les phénomènes que l'on peut citer à ce propos, le premier concerne les matières organiques. Quand celles-ci se sont déposées sur un fond de mer ou de lac, elles y subissent une décomposition, accompagnée d'une production de sulfures qui entraîne des pyritisations. Le fer, dissous dans l'eau, donne en même temps de la sidérose. La silicification est fréquente, ainsi que la phosphatisation. Plus loin des côtes, il faut se représenter, sous des pressions de plusieurs dizaines ou centaines d'atmosphères, l'eau de mer pénétrant dans les dépôts meubles d'argiles, de vases, créant et déterminant, au milieu d'elles, des réactions complexes. Bien des apparences de stratification doivent être dues à de semblables réactions, en partie secondaires, qui produisent ce qu'on pourrait appeler une sédimentation posthume.

C'est ainsi que se forment les argiles rouges et les nodules manganésifères des profondeurs marines par une altération oxydante des débris de roches cristallisées et spécialement de roches volcaniques.

Dans de tels phénomènes, qui se produisent à la superficie des sédi-

ments, mais sur une superficie sous-marine, l'activité organique semble parfois pouvoir intervenir comme un agent de modification. Il est évident toutefois que, là où ces agents organisés sont intervenus, on devait, à l'époque de leur activité, être tout à fait au voisinage de la surface sous-marine. Cette observation s'appliquera, par exemple, aux algues perforantes, dites *Girvanella*, dont on a constaté la trace sur diverses oolithes calcaires ou ferrugineuses. Le développement de ces algues, postérieur à la formation des oolithes, semble aussi postérieur à la transformation en minerai de fer, qui paraît s'être produite sur certaines oolithes calcaires de Normandie. Il faut alors que ces algues aient commencé à se développer sur les oolithes presque aussitôt après leur dépôt, dans la même phase sédimentaire, avant que plusieurs dizaines ou centaines de mètres de sédiments superposés n'aient rendu leur existence impossible. Sinon on devrait supposer, ce qui serait une hypothèse plus compliquée, ces sédiments oolithiques ramenés ultérieurement au voisinage de la superficie et altérés à ce moment, comme peuvent l'être aujourd'hui à la surface les sédiments d'âge quelconque affleurant en divers points de nos continents et de nos mers : sédiments divers, dont la définition, la détermination constituent le premier travail des géologues. L'altération en minerai de fer a donc elle-même des chances pour avoir été là un phénomène sous-marin presque immédiat.

Ailleurs, dans des conditions différentes, on peut se représenter, lorsque des dépôts se sont intercalés dans une période de mouvements successifs en sens contraire, que ces dépôts aient pu se trouver plus tard, étant encore meubles, former le fond d'un bassin de concentration lacustre ou lagunaire, où des eaux salines et métallisantes y auraient pénétré de haut en bas. Diverses minéralisations de grès et conglomérats, dont nous reparlerons à propos des minerais stratiformes cuivreux et plombés, sont peut-être attribuables à une telle cause.

CHAPITRE XI

GISEMENTS DÉTRITIQUES — GRÈS ET CONGLOMÉRATS MÉTALLIFÈRES. ALLUVIONS. PLACERS

Dans la pratique industrielle, quand on veut séparer un minerai de sa gangue ou d'autres minerais associés, on commence par broyer le tout progressivement ; puis on met le gravier ou sable obtenu en suspension dans l'eau et l'on agit ensuite au moyen de secousses répétées, de translations, de rotations, de courants, etc., en s'efforçant d'établir, entre les éléments, une classification fondée sur leur grosseur et sur leur densité. C'est le travail que la nature a réalisé d'avance pour nous sur certains produits de remaniement détritiques, dans les cours d'eau, les lacs, les moraines glaciaires, sur les plages, etc. Désagrégés au préalable par l'altération superficielle, les roches et les minerais ont été réduits peu à peu en un sable de plus en plus fin, dans lequel s'établissaient, d'abord une première classification par dureté, puis une seconde par densité. Des réactions chimiques, que nous étudierons, ont pu intervenir et, finalement, il en est résulté des produits d'enrichissement, où certains éléments denses, contenus d'abord en faible proportion dans l'ensemble, ont fini par jouer un rôle prédominant. Ce phénomène s'applique à de nombreuses substances utiles : parmi les éléments durs, à des gemmes comme le diamant, le rubis, le saphir, le corindon ; parmi les éléments denses, au platine, à l'or, à l'étain, au tungstène, au bismuth, au plomb, à la magnétite, etc.

Étant, par leur origine même, tout à fait superficiels, les gisements de ce genre ont été les premiers découverts et exploités, d'autant plus qu'ils présentaient les substances utiles à l'état isolé et à un degré de concentration qui devait attirer l'attention sur elles. Pour la même raison, ces gisements détritiques tendent successivement à s'épuiser avec une grande rapidité et leur utilisation pratique recule progressivement vers les contrées neuves, ou s'applique, avec des procédés plus perfectionnés (méthode hydraulique, dragage, etc.), à des alluvions de plus en plus pauvres. On n'exploite déjà plus guère de diamant ni de fer à l'état d'alluvions ; pour l'or et l'étain, la proportion des alluvions baisse de jour en jour. Le platine, la monazite, quelques pierres précieuses, comme le rubis et le saphir, sont maintenant à peu près les seuls corps dont l'exploitation soit confinée aux alluvions. Le sujet perd donc peu à peu de son intérêt pratique. Néanmoins l'exploitation des alluvions garde encore momentanément une grande place dans le monde. Nous allons essayer d'en exposer ici les lois générales, indépendantes de la nature du minerai considéré, afin d'éviter

plus tard des répétitions quand nous en rencontrerons des applications pour une série de corps successifs.

1° AGE DES CONCENTRATIONS MÉTALLIFÈRES MÉCANIQUES

Une première remarque à peu près évidente, qui s'applique à toutes les substances concentrées par la préparation mécanique naturelle, est que ce phénomène est étroitement lié à des manifestations continentales. Les minerais détritiques viennent des roches remaniées. Ce sont essentiellement des sédiments terrigènes. Etant lourds, ils n'ont pu être transportés au loin. On ne doit donc s'attendre à les trouver que sur les continents mêmes ou à leur voisinage tout à fait immédiat, généralement près de leur origine première, dans des lits de cours d'eau, ou tout au plus sur des rivages.

Toutes les fois que, dans l'histoire géologique, un continent émergé a eu des minerais mis à nu par l'effet de l'érosion, ces minerais ont pu subir une préparation semblable. Mais on ne peut les trouver, à chaque époque, que sur l'emplacement de tels continents.

Théoriquement on peut donc s'attendre à rencontrer des préparations de minerais détritiques dans un étage géologique quelconque, et nous en citerons bientôt des exemples ; mais il faut, pour cela, que l'on connaisse des formes continentales de la période considérée. Or on sait combien ces formes continentales deviennent rares dès qu'on recule un peu dans le passé, combien elles se localisent dans quelques zones exceptionnellement privilégiées. Il est facile de le comprendre. Pour qu'un terrain un peu ancien ait été conservé jusqu'à nous, il faut qu'il ait été recouvert par le manteau protecteur d'un terrain superposé ou d'une coulée éruptive. Si l'on pouvait supposer une zone restée continentale et sans aucun recouvrement depuis l'époque silurienne, par exemple, tout ce qui s'y serait déposé alors aurait été depuis longtemps détruit par l'érosion. Mais, en général, un recouvrement de sédiments marins ne se produit pas sans que le substratum ait subi un décapage général, qui a eu pour effet d'en éliminer les produits meubles. S'il y a eu transgression, c'est, comme nous le rappelions tout à l'heure¹, ou bien que la mer a pu revenir lentement par un mouvement de bascule sur un sol antérieurement aplani, réduit à l'état de pénéplaine, ou bien qu'un brusque effondrement a déterminé l'envahissement des flots sur un sol irrégulier que leur mouvement oscillatoire a commencé alors par niveler. Dans les deux cas, les sédiments continentaux, et surtout les sédiments fluviaux, ont des chances pour avoir disparu. Seuls à peu près font exception, dans l'histoire géologique, quelques lambeaux de sédiments protégés par une coulée éruptive, ou certains bassins de sédimentation lacustre ayant subi un enfoncement à la façon d'un géosynclinal : bassins qui, par leur extension même, ne se sont pas prêtés au genre de préparation presque sur place que nous envisageons ici.

La conséquence est que, malgré des exceptions intéressantes sur lesquelles nous allons revenir, la plupart des sédiments détritiques

¹ Page 204.

métallifères: se placent dans la dernière période de l'histoire géologique. Sauf quelques cas antérieurs cités plus loin comme curiosités, les plus anciens, encore en petit nombre, commencent au miocène. Ils deviennent plus abondants quand on aborde la grande période de creusement des vallées qui a marqué, dans certains pays, la fin du miocène ou le pliocène. On les trouve alors dans des lits de rivières qui sont souvent indépendants de la topographie actuelle, protégés d'ordinaire par une coulée de basalte qui leur a permis d'échapper à la destruction. Leur nombre s'accroît quand on aborde la phase où se sont creusées les vallées actuelles, le long desquelles on les rencontre dans des terrasses d'autant plus hautes qu'elles remontent à une époque plus reculée, où le cours d'eau plus large avait un lit moins approfondi.

Cette observation faite, si nous revenons maintenant sur les cas exceptionnels de minerais détritiques plus anciens, il faut encore ajouter, à ce propos, une observation, c'est que, pour beaucoup d'entre eux, le métamorphisme ultérieur a transformé les phénomènes originels de manière à les rendre méconnaissables. On se demande alors souvent si l'on a à faire réellement à un produit détritique, ou s'il ne s'agit pas plutôt d'une introduction ultérieure et filonienne d'eaux métallisantes dans un grès ou conglomérat d'abord stérile. Beaucoup des sédiments anciens, où l'on trouve des minerais cristallisés et liés au ciment des galets, prêtent à une objection semblable. Le cas le plus remarquable est celui des fameux conglomérats aurifères du Witwatersrand, pour lesquels on a pu soutenir d'abord l'idée d'un placier primaire, probablement dévonien, tandis que cette idée est aujourd'hui généralement abandonnée. Les conglomérats aurifères que l'on a signalés à divers étages et dans divers pays, offrent généralement matière à des discussions semblables. La plupart renferment de l'or extrêmement fin dans de la pyrite cristalline, qui elle-même se rencontre seulement dans le ciment et non dans les galets cimentés. C'est donc sous toutes réserves que nous donnons beaucoup des indications suivantes. On ne s'étonnera pas d'y voir l'or tenir une place très-prédominante. Il est probable que son inaltérabilité et sa densité l'ont amené à se concentrer particulièrement dans de tels gisements détritiques. Mais surtout il a été recherché avec un soin spécial et son éclat a attiré l'attention sur lui.

En remontant la série des terrains géologiques, nous trouverons d'abord, dans le cambrien des Black hills du Dakota, une formation de conglomérats aurifères qui sera ultérieurement décrite. Cette formation renferme, paraît-il, des grains d'or nettement roulés enveloppés par de l'oxyde de fer. Néanmoins, d'autres traits du même gisement sont en faveur, comme nous le verrons, d'une précipitation chimique ultérieure.

Dès le dévonien supérieur, on a, dans le Sud-Est de l'Australie, des remaniements de filons aurifères, qui semblent s'être continués aussi pendant la période permo-houillère des couches de Newcastle, Baccus-Marsh et Mersey, dans le Queensland, le New South Wales, en Tasmanie, pour prendre une extension spéciale au miocène.

Au carbonifère, on peut rapporter les conglomérats aurifères du Gard, dans lesquels il n'est pas sûr que l'introduction de la pyrite aurifère ne soit pas postérieure.

La même objection peut être faite pour les conglomérats aurifères carbonifériens de la Nouvelle Ecosse à Corbetts Mills, où l'on a, il est vrai, signalé des grains d'or arrondis, mais qui, bien plus nettement encore, sont traversés par des veines de quartz aurifère.

Dans le permien, nous citerons les conglomérats cuprifères et plombifères du Cap Garonne, près Toulon, où la galène a été considérée comme un produit de remaniement.

Au trias se rattache un grès aurifère trouvé en France au Donon.

Dans le jurassique, on a également signalé des couches aurifères en Californie, en Nouvelle Zélande, en Queensland. Chacun de ces cas prête à discussion. Plusieurs d'entre eux offrent, à côté de l'or, des fossiles franchement marins : ce qui est un peu singulier (Klamath, en Californie ; rivière Baroo en Queensland.). Ailleurs, dans le Placer County de Californie, l'or, supposé détritique, se trouve dans des couches que nous savons avoir été traversées par les importantes venues aurifères de la région.

Les transgressions créacées ont eu, en diverses régions, pour effet, de remanier d'abord et de préserver ensuite des produits continentaux. Nous en donnerons de suite quelques exemples, sur lesquels nous n'aurons guère l'occasion de revenir.

En Allemagne, au Nord de Goslar, à Salzgitter et Dörnten, il existe, d'après R. Beck¹, un sédiment détritique de l'époque néocomienne, englobant des fragments de jurassique et de trias, avec des débris de limonite et des nodules phosphatés : le tout constituant une couche de 3 à 25 m., que l'on a pu exploiter pour fer. On a supposé que la mer, en s'avancant, avait déplacé des minerais englobés dans le substratum complexe qu'elle recouvrait peu à peu et que les minerais de fer plus durs s'étaient trouvés assemblés sur le rivage et englobés dans un ciment, lui-même ferrugineux en même temps que siliceux.

Le même auteur rapproche de ce gisement, celui d'Ilse en Hanovre, où les débris de minerai de fer, tantôt anguleux ou seulement émoussés, tantôt nettement arrondis, que l'on a improprement qualifiés de minerais en grains, ont dû être pris à une formation continentale reposant sur le créacé inférieur et rassemblés pendant la transgression supracréacée. Il s'y associe des nodules phosphatés empruntés au gault.

La période miocène renferme, comme je viens de le dire, d'importants dépôts d'or fluviaux et côtiers en Australie.

De même en Californie, on considère aujourd'hui une grande partie des alluvions de plateaux comme miocènes et, là aussi, on voit les dépôts fluviaux de cette époque aboutir à des dépôts côtiers (comtés d'Amador et de Calaveras).

A l'époque tertiaire se rapportent aussi des sédiments fluviaux du sarmatien que l'on a pu exploiter pour fer à 4 km. Sud de Bogschan, à Pojana Wertop, dans le Sud de la Hongrie. Ces minerais, qui reposent sur des calcaires cristallins, comprennent des débris remaniés de tous les minerais classiques du type Bauat, magnétite, hémalite, grenat, etc. Les minerais de fer, dont le poids atteint plusieurs tonnes, se trouvent surtout à la

¹ R. BECK. *Loc. cit.*, t. 2, p. 418.

base de la formation. Leur proportion par rapport au stérile est de 1 à 20 ou 30.

Enfin, la période pliocène et pléistocène est celle où le phénomène a pris son extension capitale. On trouve des alluvions métallifères dans les cours d'eau actuels ; mais on en trouve aussi dans des lits de rivières depuis longtemps disparues, qu'ont postérieurement recouverts des coulées de laves, disloqués des failles et qui n'ont aucun rapport avec la topographie actuelle. C'est un fait que nous aurons à étudier longuement à propos de l'or.

2° NATURE DES PRODUITS REPRÉSENTÉS DANS LES GISEMENTS DÉTRITIQUES

Les substances utiles exploitées dans ces gisements détritiques peuvent, comme j'ai déjà eu l'occasion de l'indiquer, se ramener à deux classes : substances dures (gemmes et silicates) ; substances lourdes (composés métalliques).

Parmi les substances dures, nous verrons ultérieurement que l'on exploite, dans ces conditions, le diamant, le rubis, le saphir, le corindon, le grenat. Un certain nombre d'autres silicates, dont on ne tient pas compte parce qu'ils n'ont pas de valeur, comme l'épidote, le pyroxène, la hornblende, ont subi une concentration parallèle.

Parmi les composés métalliques, il faut d'abord remarquer que l'on ne trouvera guère dans les alluvions ceux dont les minerais sont facilement oxydables et solubles. Un simple remaniement mécanique des minerais de cuivre, de zinc, de la pyrite de fer, n'est guère possible, bien qu'on ait signalé, dans l'île de Luzon, des sables à grains de cuivre natif, et à Santa Catalina, dans l'Argentine, des conglomérats à galets de minerais cuprifères¹. La galène elle-même, peu altérable mais très friable, ne se trouvera à l'état de débris remaniés que dans des circonstances très exceptionnelles (Cap Garonne, Klondyke, Corée), où la forme réelle de son gisement prête même à discussion. Quand on rencontre des sulfures métalliques dans les gisements de ce genre — par exemple, ce qui est très fréquent, de la pyrite — on doit penser à une précipitation chimique, sinon à une venue filonienne. De même, quand on observe, comme il en existe quelques exemples rares, des feuilletés et enduits d'or natif dans des fissures de fragments rocheux (Black Hills du Dakota), ou des feuilles d'argent (alluvions de la rivière Shotover, Otago, Nouvelle Zélande). Nous verrons d'ailleurs, dans un paragraphe spécial, que l'on doit attribuer un rôle important aux cristallisations par remise en mouvement dans la forme actuelle des gisements alluvionnaires. Mais les produits normaux et indiscutables de ces gisements sont des minerais inaltérables et denses : métaux natifs comme le platine ou l'or ; composés oxydés comme la magnétite ou la titano-magnétite, la cassitérite, le wolfram ; bismuth natif et carbonate de bismuth ; monazites et terres rares. Encore, pour certains d'entre eux, verrons-nous intervenir les remises en mouvement.

¹ 1890. NOVAESE. *Sui giacim della Puna di Jujuy* (Riv. deil Serv. Min.).

3° TYPES PRINCIPAUX DE GISEMENTS DÉTRITIQUES

On peut, d'après le mode de leur dépôt, séparer plusieurs groupes, très inégalement représentés, de gisements détritiques : 1° Éluvions, qui ne sont en réalité que des altérations presque sur place ; 2° Dépôts glaciaires ; 3° Dépôts fluviatiles, catégorie de beaucoup prédominante ; 4° Sédiments formés sur les rives des lacs et de la mer. Ces divers types se distinguent les uns des autres par un transport plus ou moins accentué, dont résulte une préparation mécanique plus ou moins complète, avec des produits plus ou moins classifiés, plus ou moins fins, plus ou moins concentrés. Comme nous l'avons déjà fait remarquer et comme nous le redirons mieux à propos des dépôts fluviatiles, aucun de ces types ne témoigne, d'ailleurs, d'un déplacement considérable. Pour qu'un minerai ait pu être entraîné à plus de 2 ou 3 kilomètres de son origine, il faut presque nécessairement qu'il ait passé par la dissolution suivie d'une réprécipitation. Le plus souvent, on a la preuve que le produit remanié repose presque directement sur le produit originel et se rapproche ainsi du type des éluvions que nous examinerons en premier lieu.

a) **Éluvions et éboulis.** — Nous entendons par éluvions des produits de destruction des roches et minerais, qui se sont effectués sur des crêtes ou sur des pentes hautes à peu près sans déplacement ni transport par les eaux, et, dès lors, de préférence dans les pays secs : caractères qui les distinguent aussitôt des alluvions. L'éluvion est un stade plus avancé de la désagrégation produite par l'altération chimique, les pluies, les gelées, etc., etc., et constitue le point de départ ordinaire des types suivants. Par son mode de formation même, cette éluvion n'a subi qu'une classification presque nulle et une concentration insignifiante. Les matériaux y restent volumineux et gardent leurs angles à peine émoussés ou arrondis. Le minerai s'est seulement séparé de sa gangue, dont une partie, plus légère et friable, a pu être entraînée par le ruissellement en le laissant lui-même en évidence. Il en résulte que l'éluvion est rarement utilisable. Cependant, elle accuse parfois déjà les effets de la concentration chimique sur place étudiée au chapitre précédent.

C'est ainsi qu'on y trouvera, pour l'or, de grosses pépites, qui n'ont pas de représentants dans les parties très profondes et intactes des filons.

Nous citerons plus-tard, comme exemple d'éluvions utilisées, le cas des gisements d'étain du Mount Bischoff en Australie.

b) **Moraines glaciaires.** — Ce cas, assez spécial, n'a pu être réalisé que lorsqu'au-dessus d'un glacier se trouvaient des filons métallifères, dont les débris tombaient dans la moraine et y subissaient la classification sommaire que comporte ce phénomène. Généralement, une première préparation glaciaire a été suivie d'un remaniement fluvial qui en altère les caractères.

On attribue à une origine semblable certains gisements aurifères de l'Alaska et de la Terre de Feu, où se manifeste néanmoins d'ordinaire un remaniement fluvial.

De même, dans la chaîne des Andes au Pérou, certains placers aurifères situés à 4 700 m. d'altitude sont considérés comme d'origine glaciaire.

Peut-être également faut-il faire rentrer dans ce groupe les conglomérats aurifères (éocènes ?) de la Boukharie.

c) **Dépôts fluviatiles.**— Ce genre de dépôts constitue à peu près exclusivement les gisements utiles que nous avons à considérer dans ce chapitre. Pratiquement, comme nous l'avons déjà dit et comme nous le reverrons plus en détail à propos de l'or, ce déplacement fluvial a pu commencer dès les plus anciennes périodes géologiques, mais s'est surtout accentué depuis le pliocène et le pléistocène. Suivant leur âge, les alluvions utiles peuvent occuper des niveaux plus ou moins hauts au-dessus des vallées actuelles, être à nu ou, au contraire, rester recouvertes par d'autres alluvions stériles ou par des coulées de basalte. Ce sont là des distinctions très importantes pour leur exploitation, que nous allons envisager en étudiant tour à tour les divers caractères essentiels de ces dépôts.

Les caractères généraux les plus saillants de toutes ces alluvions fluviatiles sont les suivants : par exemple dans les placers aurifères de la Californie, qui peuvent nous servir de types.

On a là, sur près de 400 km. de long et jusqu'à une altitude de 2100 m. des rigoles plus ou moins larges, remplies par des produits détritiques, dont les plus anciens sont miocènes et quelques-uns pliocènes. Ces couches fluviatiles, où s'intercalent parfois des tufs volcaniques et que peuvent recouvrir des basaltes, reposent sur un lit de schistes, que l'on appelle la roche du lit ou « bedrock », et c'est d'ordinaire au contact de ce bedrock que l'or s'est surtout accumulé, bien qu'il arrive d'en trouver à d'autres niveaux. L'or y est contenu à l'état de fine division et associé à des pyrites qui, dans les zones non altérées au contact de l'air, donnent une teinte bleue (gravier bleu) et, dans les parties oxydées, une teinte rouge (gravier rouge). L'épaisseur va de quelques centimètres à 15 m. La teneur est très variable depuis zéro jusqu'à plusieurs francs. Parfois on a jusqu'à trois niveaux aurifères superposés.

Comme autre type connu d'alluvions aurifères, présentant les mêmes caractères généraux que la Californie avec quelques particularités locales, nous citerons les placers du bassin du Yukon dans l'Ouest du Canada. Près du fleuve Klondyke, il existe là une série de terrasses aurifères, dont les plus hautes offrent, à la base et sous des terrains stériles, une couche blanchâtre riche en quartz et en or (*wite gravel*), qui a pu atteindre 25 m d'épaisseur. L'or y est en petites feuilles arrondies et en noyaux. Également dans l'Alaska, au cap Nome, on a, le long de la mer, une couche de sable aurifère teintée en rouge d'environ 10 cm. d'épaisseur, qui peut s'étendre sur 20 m. de large.

En Sibérie, les placers de la Lena ont, dans le cercle d'Olekma, une teneur moyenne de 3 gr. sur 1 à 2 m. d'épaisseur pour les parties exploitables ; dans le Vitim, on arrive exceptionnellement à 10 et 14 gr. Beaucoup des alluvions sibériennes sont profondément gelées.

Pour étudier dans leur ensemble les alluvions utilisées, le premier point est d'examiner comment s'est opérée la *préparation mécanique* dont résulte la concentration des matériaux utiles. A cet égard, nous

résumerons les très intéressantes expériences de Fayol, qui ont bien précisé, dans un cas particulier, la manière dont s'usent et se classifient les débris rocheux. Le cas qu'il a étudié ne comportait pas de minerais ; mais les observations faites par lui ne sont pas moins applicables à la généralité des cas¹.

Ses études ont eu lieu dans un bassin hydrographique, dont la carte géologique était dressée avec assez de soin pour permettre de reconnaître la provenance exacte de tous les galets que contenait, en un point quelconque, l'alluvion. Il a, dès lors, établi, sur la longueur d'un cours d'eau, la loi d'usure et de disparition des divers matériaux et montré avec quelle rapidité des roches dures elles-mêmes s'éliminent pour ne laisser finalement que du quartz ou certains silicates. Par exemple, dans la petite rivière la Banne, de la région de Commeny, il a constaté qu'à la sortie d'un massif de schistes avec rares filons de granulite, les galets contenaient d'abord 70 p. 100 de schistes et 13 p. 100 de granulite ; 2 km. plus loin, quoiqu'il s'agisse d'une rivière très calme, presque arrivée à son profil d'équilibre, les schistes sont réduits à 30 pour 100 et moitié plus petits ; au bout de 4 km., ils ont à peu près complètement disparu. Le granite et la granulite, qui résistent plus longtemps, s'usent également en 12 ou 15 km. ; le quartz seul persiste davantage et finit par composer la presque totalité des alluvions lorsque le cours d'eau sort des roches primitives pour couler sur des sédiments.

Ces chiffres, qui confirment ce qu'enseigne l'étude directe des alluvions métallifères, doivent, quand il s'agit de celles-ci, être considérés comme des maxima très rarement atteints. Les minerais se sont, en effet, déposés dans des eaux beaucoup plus torrentueuses ; et, d'autre part, leur densité les amenait à se déposer beaucoup plus rapidement. On peut se rendre compte de l'influence de la vitesse par le petit tableau suivant, applicable à des granites, qui montre la vitesse nécessaire pour entraîner des blocs d'une dimension déterminée. Naturellement, plus la densité croît, plus la vitesse nécessaire à l'entraînement augmente.

TABLEAU 8 — VITESSE NÉCESSAIRE POUR ENTRAINER DES BLOCS D'UNE DIMENSION DÉTERMINÉE

	m.	m.	m.	m.	m.
Dimension des blocs ou graviers. . . .	1	0,20	0,05 à 0,10	0,03 à 0,05	0,01 à 0,02
Vitesse d'entraîne- ment par seconde.	5	2	1 à 1,50	0,70 à 1	0,60 à 0,70

En s'éloignant du point de départ, on a des produits de plus en plus fins et bien classés. Pour les corps qui conservent toute leur valeur en se divisant, comme la cassitérite, l'or, le platine, ce sont ces couches fines qui donneront les exploitations les plus fructueuses ; on conçoit qu'il n'en est plus de même pour les gemmes, dont la valeur est souvent plus que proportionnelle au carré du poids.

Dans cet entraînement par les cours d'eau et dans la précipitation qui la suit, il est facile de voir combien interviennent certaines circonstances,

¹ 1886. FAYOL. *Etudes sur le houiller de Commeny* (Lithologie, p. 379).

telles que la sinuosité du cours d'eau, l'irrégularité de son fond, etc., et d'autre part, la forme plus ou moins aplatie des grains emportés.

En ce qui concerne la *sinuosité du cours d'eau*, on voit, souvent, la concentration se faire en des points de remous ou de tourbillonnement. Les diamants du Brésil, l'or des Guyanes se sont accumulés dans des entonnoirs que l'on appelle au Brésil des caldeiros (chaudières). Tel est aussi le cas pour les « pieds d'éléphant » (nellan) des gemmes indoues. Dans le tracé des anciennes rivières aurifères de Californie, on voit très bien les points de concentration correspondre à des courbes, à des confluent.

Le rôle du *stratum (bedrock)* est plus important encore. Voici comment nous l'interprétons. Tout d'abord il est aisé de comprendre que le début d'une phase alluvionnaire a nécessairement correspondu à un moment où les filons métallifères contenus dans la chaîne émergée se trouvaient mis à nu, avec leur concentration superficielle résultant d'une longue altération continentale. C'est donc au début de cette période qu'il a dû y avoir le plus de ces métaux entraînés par les eaux, tandis que, plus tard, le phénomène a dû s'atténuer par ses effets mêmes : tout ce qui avait été précédemment détruit et entraîné n'étant plus à prendre.

En outre, dans le phénomène de l'alluvionnement, l'or et les autres substances lourdes doivent à chaque moment tendre à tomber au fond, comme dans la battée d'un laveur d'or ou dans un crible du Harz. Tant que l'alluvionnement aurifère continue à s'opérer au-dessus d'une couche de matériaux meubles, cette descente progressive de l'or vers le fond s'accroît par l'entraînement des eaux. Et l'on a même pu se demander, comme nous le dirons, si la descente de l'or vers le fond n'avait pas continué longtemps après que l'alluvion était émergée et par un effet de circulations aqueuses souterraines. Ce dernier phénomène n'a certainement pas toute l'importance qu'on lui a attribuée. Il doit cependant être retenu. La conséquence est que la couche aurifère principale tend toujours à se former vers la base d'une zone alluvionnaire, là où la descente de l'or est arrêtée : soit par le *stratum solide* que l'on a pris l'habitude d'appeler le *bedrock*, soit, du moins par un lit argileux, jouant le même rôle dans une phase ultérieure. Cela est vrai surtout pour les grains d'or un peu volumineux qui ne se trouvent que dans ces conditions.

Quand le gravier métallique roule, entraîné par les eaux, sur le fond d'une rivière, si le sol de celle-ci est uni et sans aspérités, les minerais ont du mal à s'y accumuler. Il en est tout autrement quand ce sol est rugueux, comme une formation schisteuse redressée prise transversalement, dont les couches en dent de scie arrêtent l'or, ainsi que le font les filaments de la peau de mouton des laveurs turkomans. C'est une des raisons pour lesquelles on a rarement des placers riches sur un fond granitique, outre que l'intérieur des massifs granitiques ne contient guère de veines aurifères susceptibles de se prêter à l'alluvionnement. Au contraire, l'or de placers s'est très fréquemment accumulé sur des schistes, pénétrant jusqu'à une certaine profondeur dans leurs délits ou fissures. Il s'est également concentré dans les cavités en entonnoirs ou en poches que présentent volontiers des fonds calcaires. Enfin, quand la disposition du fond s'y prêtait, il a pu y remplir certaines rigoles, ou *channels*.

La conséquence pratique est que, dans la plupart des champs d'allu-

vions, on a une et une seule couche riche immédiatement sur le bedrock. Plus rarement, il revient, au-dessus, une ou même plusieurs autres couches métallifères, souvent mais non toujours superposées à de faux bedrocks (false bottom), représentés par une couche d'argile stérile, un banc silicifié, une intercalation de roche éruptive¹. Notamment, un lit d'argile stérile correspond à une phase où la destruction torrentielle s'est calmée pendant un temps plus ou moins long, permettant à des eaux calmes de déposer leurs produits vaseux. Après quoi, un changement notable, soit dans les précipitations pluvieuses, soit dans le bassin d'alimentation des eaux, soit même dans le relief du sol, a déterminé une nouvelle phase violente qui, agissant probablement sur des parties des gîtes métallifères non attaquées par l'érosion précédente, a de nouveau concentré des minerais.

Nous venons d'exposer la théorie qui nous paraît la plus vraisemblable. Étant donné l'importance de cette question du bedrock, il faut, avant d'aller plus loin, s'arrêter un instant pour discuter les théories différentes qui ont été proposées.

La première interprétation de ce phénomène, immédiatement venue à l'esprit de tous, avait été un simple effet de préparation mécanique au moment même du dépôt, les parties métalliques les plus lourdes ayant dû nécessairement tomber en bas, comme nous l'avons, d'ailleurs, précédemment supposé. On a fait plus tard à cette théorie trop simple l'objection très justifiée que, dans une coupe d'alluvions comprenant une dizaine de couches, dont l'inférieure seule est aurifère, les neuf couches stériles s'étaient déposées d'ordinaire, non en même temps que la couche riche, mais postérieurement, en sorte que la préparation mécanique, admissible suivant la longueur du profil d'un ruisseau en plan horizontal, l'était difficilement en coupe verticale. En outre, la classification des éléments du haut en bas dans de telles alluvions est extrêmement irrégulière.

On a alors (Posezpnny)² fait intervenir le phénomène connu, et rappelé plus haut, par suite duquel les substances lourdes descendent progressivement dans un terrain meuble, comme les minerais dans un crible à secousses, et on lui a attribué un rôle essentiel, presque unique, dans la concentration de l'or fin, supposée réalisée par une descente progressive à travers les alluvions³.

Cette idée, si on veut lui attribuer une importance trop générale, soulève à son tour bien des objections. Tout d'abord on s'explique difficilement comment cette descente aurait constamment stérilisé les couches supérieures, sans y rien ou presque rien laisser de l'or qu'elles seraient

¹ Voir diverses coupes d'alluvions, figures 549 à 555. Sur les figures 550, 551, 554, on voit la superposition de coulées éruptives. La figure 549 montre deux lits aurifères superposés, le plus haut étant au-dessus d'une couche d'argile.

² 1887. POSEZPNY. *Zur Genesis der Metallseifen* (Ost. Z. f. B. u. H., t. 25, p. 525).—1894. LE MÊME. *Ueber die Genesis der Erzlag.*, p. 207.

³ Dans le même ordre d'idées, on a observé, sur d'anciens résidus de lavage, un enrichissement vers la base. On sait également qu'il se produit, de la même manière, des descentes d'objets archéologiques, que les historiens ne prennent pas toujours suffisamment en considération.

supposées avoir contenu d'abord en quantités à peu près égales à la teneur de la couche de base. Il semblerait que certaines surfaces imperméables, des argiles par exemple, auraient dû arrêter la descente de l'or et manifester une concentration de celui-ci à leur partie supérieure. De plus, le fait, assez fréquemment constaté, de couches aurifères nouvelles superposées à la couche du bed-rock avec des intervalles variables ne serait, dans cette théorie, explicable que si, comme on l'a affirmé à tort, ces couches supérieures avaient nécessairement un substratum imperméable, tandis qu'en réalité, on retrouve fréquemment une couche aurifère supérieure superposée à un gravier stérile. Enfin, malgré l'idée très plausible d'un accroissement sur place par dissolution, l'abondance des gros fragments aurifères dans la couche inférieure, de pépites atteignant 50 à 70 kg., ne s'accorde guère avec cette pénétration progressive.

Attribuant donc à ce phénomène un rôle probable, mais restreint, il me paraît beaucoup plus vraisemblable d'expliquer surtout, comme nous venons de le faire, la concentration ordinaire sur le bed-rock par les conditions toutes spéciales dans lesquelles s'est formée cette première couche d'alluvions, qui correspond, par définition même, à un commencement des circulations d'eau actives sur la superficie par l'effet d'un changement de climat ou d'une modification dans le relief. Pour une raison ou une autre, les cours d'eau se sont trouvés alors en présence des chapeaux de filons et des affleurements aurifères de tous genres, à la suite d'une altération sur place qui y avait longuement préparé et isolé l'or, comme cela se fait toujours dans les chapeaux de filons. Dès lors, ils ont eu nécessairement des quantités toutes particulières d'or à déplacer. Nous avons vu en outre — et cette remarque a, dans le cas présent, une grande importance — que l'or des alluvions a généralement subi un transport très faible ; le phénomène qui l'a accumulé est presque celui qu'on a appelé éluvial, ou remaniement sur place, par opposition au phénomène alluvial. Or l'or des alluvions provient des roches du fond. Il est donc tout naturel que cet or se soit concentré dans les dépôts quand ces couches du fond étaient accessibles à la force abrasive, quand elles étaient à nu, tandis que, postérieurement, quand le lit de la vallée a été encombré des premiers matériaux détritiques, les cours d'eau, circulant sur ceux-ci, n'ont plus pu que leur emprunter des matériaux de seconde main, et, nécessairement, en quantités beaucoup plus faibles. On raisonne trop comme si chaque couche d'alluvions, superposée à la précédente, avait puisé également ses matériaux dans une même réserve contenant autant d'or disponibles et à égale distance du point où le placer s'est enrichi.

Nous devons maintenant examiner les *conditions minéralogiques*, dans lesquelles se trouvent les minerais d'alluvions, notamment l'or et le platine. Bien des raisons concourent à montrer que les alluvions, surtout quand elles sont un peu anciennes, ne sont pas restées telles qu'elles s'étaient déposées, mais qu'elles ont subi postérieurement une évolution, une métasomatose dont nous avons déjà eu l'occasion d'examiner les lois générales. La métasomatose, a pour première conséquence la soudure la silicification des agrégats, d'abord meubles, qui se transforment progressivement en roches dures et compactes. Cette silicification, dont les effets apparents sont immédiatement visibles, n'est évidemment pas le

seul phénomène de ce genre, et les minerais, de leur côté, ont subi un déplacement chimique, une recristallisation, qu'on est conduit à étendre, en dépit des apparences premières, à des corps insolubles tels que l'or, le platine, la cassitérite, etc.

Le premier fait qui paraît résulter de ces réactions ultérieures est l'état dans lequel se trouve l'or, associé d'abord à des pyrites et cristallisé d'autre part en pépites souvent très volumineuses, d'ordinaire arrondies ou émoussées, mais parfois aussi présentant des faces cristallines si nettes qu'elles ne sont guère compatibles avec un transport pour une substance aussi molle. Nous allons successivement examiner ces deux points.

En premier lieu, l'or des graviers aurifères anciens, tels que ceux de Californie, se trouve dans des couches que caractérise aussitôt leur couleur : rouge à la surface, bleue en profondeur. Les graviers rouges (red gravel) sont évidemment dus à une peroxydation du fer. Mais cette peroxydation ne doit être qu'un dernier épisode très postérieur à la formation même des alluvions, puisque, plus profondément, on trouve des alluvions bleuies par la présence de la pyrite. Ces formations de blue gravels, si la pyrite y avait toujours présenté cette forme, seraient bien difficilement explicables avec un phénomène torrentiel effectué dans des eaux nécessairement très chargées d'oxygène, presque à l'air libre. On est ainsi amené à supposer que cette cristallisation de la pyrite a pu se faire après coup en profondeur sur des dissolutions sulfatées provenant de pyrites, tout d'abord sédimentées, puis redissoutes et soumises à des actions réductrices.

L'étude des grains d'or eux-mêmes conduit à des conclusions analogues.

On trouve fréquemment, dans les alluvions, des pépites aurifères beaucoup plus volumineuses que les cristaux ordinaires des filons¹. Certaines d'entre elles proviennent évidemment d'affleurements filoniens détruits et à peine remaniés, comme l'indique le quartz qu'elles englobent encore; quelques-unes ont été manifestement roulées; mais d'autres ne sont pas émoussées comme après un long transport, et présentent, ou des formes cristallines, ou des dispositions concrétionnées, mamelonnées, avec des sortes de tubercules, d'excroissances, sans retenir de quartz, comme c'est le cas ordinaire des fragments d'or filoniens. Parfois, les cristallisations aurifères ont pénétré dans les fissures du bedrock. Enfin, on a souvent cru constater un degré de finesse plus grand de l'alliage aurifère dans les pépites que dans les filons. Nous dirons de plus, au chapitre de l'or, que la circulation actuelle ou très récente des solutions aurifères capables de cristalliser dans les terrains a été directement prouvée. On a vu de la pyrite de fer aurifère se déposer ainsi sur des morceaux de bois, de tourbe, monter même dans les tiges d'arbres plantés sur un champ d'or (Guyane anglaise). L'or existe également en proportions notables dans l'eau de mer, et l'on pratique aujourd'hui couramment d'une façon industrielle la dissolution de l'or dans les liqueurs très étendues de cyanures ou de chlorures, etc. De tous ces faits résultent de fortes probabilités pour que des concentrations par recrಿಸ-

¹ On cite deux nuggets australiens de 70,9 et 67,3 kg., un ouralien de 36 kg. Dans les filons, on a cependant trouvé, à Sierra Buttes en Californie, un cristal d'or de 40 kg.

tallisation secondaire après dissolution chimique soient intervenues pour déterminer la forme actuelle des alluvions aurifères.

L'un des faits que nous venons d'énumérer, le plus contestable, peut-être faute d'observations assez nombreuses et assez précises, mais d'autre part celui qui serait le plus convaincant si la démonstration irréfutable en était acquise, à savoir la finesse plus grande de l'alliage des pépites dans les alluvions, avait déjà été constaté par Poszepny dans l'Oural (or à 90 p. 100 de fin dans les alluvions, à 86 p. 100 dans les filons). Nous aurons à mentionner, dans le champ de l'Olekma, une différence encore bien plus forte. On en a également signalé des exemples au Klondyke et en Colombie. Mais, comme nous le ferons remarquer à propos de ce dernier pays, la différence du titre tient parfois en partie à la façon différente dont se fait l'extraction de l'or dans les deux catégories de gisements.

L'enrichissement par dissolution que nous supposons ici a pu se réaliser dans l'alluvion même. Il a dû commencer antérieurement dans la période d'altération qui a précédé et accompagné l'érosion dont les alluvions résultent. Il est certain que, pendant les longues périodes de temps où les parties supérieures des gisements primitifs ont été soumises aux actions oxydantes des eaux relativement superficielles, il s'est produit en eux une concentration de l'or, en même temps qu'une dissolution de la pyrite aboutissant à rendre les minerais plus friables. Sans cesse, une partie notable de l'or dissous est descendue dans les terrains en suivant leurs fissures et y a concentré une quantité d'or croissante, puisqu'elle venait de parties de plus en plus étendues des terrains supérieurs progressivement atteints par cette altération. Cette dissolution de l'or est prouvée à l'évidence par les cas où l'on a retrouvé le métal cristallisé sur des fragments végétaux. On peut même se demander si certaines veines de quartz légèrement aurifères rencontrées dans les schistes, auxquelles on attribue plus généralement une origine interne en relation avec le métamorphisme, ne seraient pas, du moins en partie, un résultat de cette concentration de la silice et de la pyrite aurifère, dissoutes ailleurs, puis entraînées dans les fissures. Quoi qu'il en soit, ces conditions ont certainement contribué à former, au début de la période érosive actuelle, des alluvions particulièrement riches, occupant les terrasses les plus élevées (parce que les plus anciennes), ou ultérieurement recouvertes par des formations plus récentes, quelquefois même (surtout en Californie ou en Australie) par des basaltes.

Nous constaterons plus tard quelque chose de tout à fait analogue pour la cassitérite, dont les grains semblent avoir pu subir un enrichissement analogue et peut-être même faut-il y songer, avec beaucoup de réserves, pour le platine.

d) Dépôts littoraux. — On voit très bien, sur nos plages actuelles, comment le mouvement oscillatoire des vagues peut à la longue déterminer une concentration de substances dures et lourdes, qui a dû également se réaliser à des époques anciennes et dont les bords des lacs peuvent également présenter des exemples réduits. Le cas le plus net et le plus banal de ce phénomène est celui qui, sur les côtes de la Manche,

détruit les craies à silex pour produire, d'abord des terrasses de galets exclusivement siliceux, puis des sables fins, où prédomine également le silex. Ailleurs, sur les côtes bretonnes, où la mer remanie des roches cristallines et des terrains primaires, on trouve des sables d'épidote, grenat, hornblende et autres silicates, dont la teneur en cassitérite et en or peut être parfois suffisante pour justifier presque une exploitation industrielle. Dans la baie de Naples il se concentre des sables d'augite et de magnétite empruntés aux laves du Vésuve. Des sables à magnétite ainsi formés ont certainement joué un grand rôle dans les métallurgies préhistoriques, et aujourd'hui l'attention se reporte à nouveau sur eux, comme nous le dirons au chapitre du fer.

Nous nous contenterons de citer les sables à magnétite légèrement aurifères que l'on connaît sur la côte californienne entre Point Mendocino et l'embouchure de l'Umpqua ; ceux à magnétite titanifère de la province Taranaki dans l'île Nord de la Nouvelle-Zélande ; ceux d'Usambara dans l'Afrique orientale allemande.

On trouve encore aujourd'hui, sur quelques plages inhospitalières à l'extrémité Nord de l'Alaska, ou à la Terre de Feu, des plages au sable aurifère mêlé de magnétite, de grenat et autres produits de préparation mécanique. Il est probable que, dans les contrées habitées, le même phénomène a existé autrefois, mais que ces sables ont été depuis longtemps épuisés.

Avec la magnétite, il s'est, comme nous venons de l'indiquer en passant, parfois rassemblé un peu d'or ou de platine. De même encore des sables à diamants sont l'objet d'exploitations dans l'Afrique occidentale allemande. Des faits analogues se sont produits à des époques anciennes. Il suffit d'en citer un exemple sur certains rivages miocènes de l'Australie et de la Californie, où se sont réalisés de véritables placers aurifères. Plus récemment, nous verrons qu'une concentration d'or semblable a eu lieu dans l'Alaska sur les côtes du cap Nome.

CHAPITRE XII

GISEMENTS DE TRANSPORT CHIMIQUE. ÉVAPORATIONS SALINES. GITES SÉDIMENTAIRES ET STRATIFORMES

L'eau qui circule à la surface de la Terre ou au voisinage de la surface a sans cesse l'occasion de dissoudre des éléments chimiques empruntés aux roches et terrains avec lesquels elle se trouve en contact. Cette action, accélérée par la présence de l'acide carbonique, des acides minéraux ou organiques, des chlorures, nitrates, enfin par la possibilité des oxydations qui substituent des sulfates solubles à des sulfures cristallins, est l'origine de toutes les remises en mouvement examinées aux chapitres ix et x. Quand la reprécipitation ne se produit pas, comme nous l'avons supposé alors, les eaux minéralisées et métallisées circulent le long des vallées jusqu'à ce qu'elles aboutissent à des lacs, à des bassins de concentration ou d'évaporation désertiques, ou enfin à la mer. Il peut alors arriver que, soit dans ces bassins de concentration lacustres, soit dans des lagunes isolées de la mer, une évaporation se produise suffisante pour amener la précipitation directe, ou bien encore qu'un agent précipitant, tel que les réducteurs organiques, qu'une action fixante de nature microbienne interviennent. On obtiendra finalement le dépôt d'une substance utilisable. Et ce dépôt, dont nous constatons des exemples actuels, pourra également se retrouver conservé dans un étage sédimentaire quelconque. Le reste des produits emportés vers la mer s'y accumule et tend constamment à accroître la minéralisation des eaux, malgré les retours momentanés à la sédimentation. Il en résulte, dans la mer, la présence d'une foule de métaux en quantités appréciables. Nous citerons plus tard le cas de l'or, dont on a songé parfois très ambitieusement à extraire les traces contenues dans les océans.

Parmi les gisements ainsi produits par précipitation chimique, nous aurons à considérer deux cas bien distincts : 1° Gites d'évaporation ou de concentration saline (sels de soude, de potasse, de magnésie, de chaux, chlorures, sulfates, carbonates, nitrates, borates, etc.) ; 2° Gites de minerais sédimentaires, dont un certain nombre de cas discutables seront séparés par nous pour être décrits, sans plus de précision, ni d'affirmation sur leur origine, comme simplement stratiformes.

1° GISEMENTS D'ÉVAPORATION SALINE

Il existe un groupe important de dépôts minéraux qui ont pour origine des phénomènes de concentration et d'évaporation exercés sur des dis-

solutions salines. Les phénomènes qui se sont produits à ce propos intéressent beaucoup de richesses minérales : les sels de potasse et de soude, les gypses, etc. Les nombreux problèmes qui se posent à cette occasion peuvent être divisés en deux groupes : l'un chimique, pour lequel nous sommes aujourd'hui assez bien renseignés; l'autre géologique, pour lequel il nous manque encore bien des éléments, notamment une étude plus précise des organismes associés avec les concentrations salines. Nous allons commencer par rappeler sommairement l'enseignement apporté par la chimie; nous passerons ensuite au côté géologique de la question, qui comporte une application, faite ultérieurement, aux divers gisements salins examinés dans cet ouvrage¹.

Chimie des gisements salins. — Évaporation normale de l'eau de mer.

— Chimiquement, le problème serait très simple et pourrait être résolu par une expérimentation élémentaire si nous devons supposer que les évaporations se sont produites avec la rapidité de nos expériences dans les conditions actuelles de la température superficielle. Il suffirait alors de faire évaporer de l'eau de mer, qui est le type le plus complet et le plus banal de la dissolution saline et d'examiner l'ordre de dépôts des substances précipitées. Dans l'ensemble, cet ordre d'évaporation donne une première approximation grossière de la réalité des faits; nous devons donc l'envisager d'abord; après quoi, nous aborderons l'examen des modifications entraînées dans les conditions de dépôt par des variations dans la température et dans la vitesse de précipitation.

Quand de l'eau de mer s'évapore ainsi à la température ordinaire, il se précipite bientôt un faible produit constitué par du *carbonate de chaux avec traces de strontiane* et du sesquioxyde de fer hydraté, mêlé à une légère proportion de manganèse. Sans déposer d'autres corps que ceux-là, une couche d'eau de mer de 1 m. d'épaisseur diminuera jusqu'à une épaisseur de 0,20 m.

A ce moment, elle abandonne un abondant précipité de *gypse*, identique à celui des terrains géologiques, et cela jusqu'à ce que l'épaisseur ne soit plus que de 0,12 m.

Puis, il y a un arrêt dans le dépôt jusqu'à ce que l'épaisseur soit réduite à 0,10 m. et, cette fois, c'est du sel gemme qui se précipite. La distinction entre ces deux phases est si nette que les paludiers en profitent pour faire passer l'eau qui vient de déposer son gypse dans les bassins ordinaires, dans des bassins spéciaux où l'on obtient une couche de *sel pur*.

Lorsque l'eau n'a plus que 0,05 m., le sel devient amer, il s'y joint du sulfate de magnésium arrivant, pour une épaisseur de 0,03 m., à être en proportion égale à celle du sel; c'est le *sel mixte*.

Enfin, quand l'eau est réduite à 0,02 m., il se dépose de la *carnallite*.

Après quoi, il reste encore une *eau mère*, riche en chlorure de magnésium et contenant une certaine quantité d'acide borique qui, dans les conditions ordinaires, même dans les régions les plus chaudes du globe, ne se dessèche jamais.

Ainsi, nous voyons que l'évaporation complète d'une lagune à la pres-

¹ Voir au tome 2.

sion ordinaire laisserait de haut en bas la succession des dépôts suivants :

1. Sels déliquescents, renfermant surtout du chlorure de magnésium avec un peu d'acide borique.
2. Carnallite.
3. Sel mixte, chlorure de potassium, sulfate de magnésie.
4. Sel marin mélangé de sulfate de magnésie.
5. Sel marin.
6. Gypse pur.
7. Faible dépôt de calcaire avec sesquioxyde de fer.

Les proportions relatives des divers sels dans l'eau pendant les phases successives sont les suivantes :

TABLEAU 9 — COMPOSITION DE L'EAU DE MER A DIFFÉRENTES PHASES DE SON ÉVAPORATION

	P Spéc.	NaCl.	KCl	MgCl ²	MgSO ⁴
Mer normale.	1,02	2,94	0,05	0,32	0,24
Formation du sel gemme.	1,21	22,22	0,40	2,44	1,87
For. du sulfate de magnésie.	1,32	12,10	2,49	14,79	8,67

La carnallite se forme à 25° quand, pour 1 000 d'eau, on a 6 KCl et 89 MgCl².

D'après la coupe théorique que nous venons de donner, il peut, dans un terrain, exister du gypse seul ; mais la présence du sel marin implique toujours celle du sulfate de chaux au-dessous et, de même, sous la carnallite (produit le plus rare de la série puisqu'il a été le dernier à se réaliser), on doit avoir nécessairement du sel marin, puis du gypse. C'est à peu près, en effet, ce qu'on observe ; mais les phénomènes réels sont toujours plus compliqués que ne le laisse supposer cette théorie ; et c'est un premier point où il y a lieu d'examiner la part qu'ont pu prendre les phénomènes d'ordre géologique, et d'abord, le rôle plus simple des réactions chimiques, directement réalisables dans nos laboratoires, mais réalisables dans des conditions de température ou de vitesse qui ne sont plus toujours exactement celles de la simple évaporation à l'air libre.

Évaporation d'un milieu salin complexe. — Les conditions de dépôt d'un milieu salin complexe ont été surtout étudiées par le chimiste Van't Hoff. Il est difficile, sans entrer dans des détails qui trouveraient mal leur place ici, de préciser les résultats obtenus par ce savant. Nous nous bornerons à en énoncer le principe. Leur conclusion pratique est de prévoir, d'après la température et la composition d'un mélange salin originel à termes très nombreux, l'ordre de superposition des précipités, ou, inversement, de pouvoir, connaissant celui-ci, ce qui est le cas en géologie, remonter à la dissolution première et à ses conditions de dépôt.

Quand, opérant d'abord à la température ordinaire, on prend une dissolution saline un peu complexe, les dépôts ne s'effectuent pas simplement en commençant par le corps le plus insoluble et suivant l'ordre inverse des solubilités. La solubilité de chaque sel varie, suivant des lois que l'on peut déterminer d'abord théoriquement et vérifier ensuite par l'expérience, avec la nature et la proportion des sels dissous en même

temps dans la même liqueur ; et, cette proportion se trouvant modifiée au fur et à mesure de l'évaporation par les étapes mêmes du dépôt, il peut en résulter des phénomènes dont on se rend compte par une représentation géométrique à autant de dimensions qu'il y a de sels en présence.

Pour prendre le cas le plus simple, 1 000 molécules d'eau qui, à 25°, dissoudraient séparément, soit 111 molécules de chlorure de sodium, soit 88 de chlorure de potassium, ne dissolvent, lorsque les deux sels sont réunis, que 89 du premier et 39 du second (au total 128). Dans une dissolution de ces deux sels qui s'évapore, le rapport des deux sels (qui n'est pas celui de la saturation) commence par rester le même, leur proportion absolue se modifiant, jusqu'au moment où l'on atteint la saturation pour l'un des deux. Alors l'excès de celui-là se dépose ; puis, quand la proportion des deux sels qui correspond à la saturation est réalisée, les deux sels se déposent ensemble. Si, au lieu de deux sels sans action l'un sur l'autre, la dissolution comprend du chlorure de potassium et du chlorure de magnésium, qui, en se combinant dans une proportion déterminée, donnent la carnallite, on peut commencer par avoir un dépôt de chlorure de potassium ; puis, simultanément, du chlorure de potassium et de la carnallite ; de la carnallite seule, à laquelle vient s'ajouter du chlorure de magnésium ; et, enfin, ce dernier sel tout seul. Quand il y a, comme c'est le cas dans toutes les dissolutions naturelles en voie d'évaporation, et, notamment, dans l'eau de mer, un grand nombre de sels en présence, susceptibles en outre de former des combinaisons diverses deux à deux ou trois à trois, le nombre des produits réalisables augmente et leur ordre se complique, mais peut néanmoins être prévu suivant des lois précises.

Le cas ordinaire des dissolutions naturelles est celui où le chlorure de sodium est en quantité très prédominante et peut être considéré comme saturant la liqueur. On voit alors se produire à 25° des sels que l'on n'obtiendrait seuls qu'à une température bien supérieure.

Si, au lieu d'opérer à la température ordinaire, on a une *température* plus élevée, non seulement les coefficients de solubilité se trouvent modifiés (généralement avec augmentation, puisque la plupart des dissolutions absorbent de la chaleur) ; mais il intervient, en outre, de nouvelles combinaisons salines qui ne pouvaient auparavant se produire, tandis qu'il en disparaît d'autres. Ainsi, à 25°, en envisageant seulement les sels de soude, potasse et magnésie, 12 composés peuvent se déposer dans l'eau de mer. Trois de ceux-ci disparaissent entre 25 et 37°. Trois autres apparaissent entre 37 et 55°. Trois sont encore éliminés de 55 à 85°.

Après la température, le facteur *temps* a également une influence, qui doit être considérée comme de premier ordre toutes les fois qu'il s'agit d'un phénomène géologique : influence qui contribue à établir, entre les réactions de nos laboratoires et celles de la nature, des différences auxquelles on ne pense pas toujours assez. Souvent, en laissant des dissolutions abandonnées à elles-mêmes pendant des mois, on a vu se réaliser des corps qui, habituellement, auraient nécessité une température bien plus élevée.

Quant à la *pression*, dont il était logique d'envisager également le rôle, il a été démontré que son influence était presque négligeable. Elle intervient en modifiant le coefficient de solubilité, qui est diminué quand la

dissolution d'un sel provoque une dilatation, augmenté dans le cas contraire : cas presque général. Le sel gemme dissous à 40 atmosphères de pression se dépose en partie quand on revient à la pression ordinaire. A 1500 m. de profondeur, sous 180 atmosphères, le chlorure double de calcium et de magnésium nommé tachydrite se produit à 25° au lieu de 22° à la pression ordinaire. Mais cette profondeur de 1500 m. a bien des chances pour n'avoir pas été réalisée dans les conditions réelles des évaporations naturelles et il semble que l'on soit en droit de considérer, dans la formation de nos gisements salins, cette influence de la pression comme secondaire.

Un point à retenir est qu'à 25°, une solution, dont la tension de vapeur est inférieure à 15,5 mm de mercure¹, dépose de l'anhydrite, alors qu'il se forme du gypse si cette tension est supérieure.

Si on envisage donc l'évaporation de l'eau de mer, on voit le chlorure de sodium commencer à se former dans le domaine du gypse, puis le sulfate de magnésie dans le domaine de la polyhalite, (sulfate de chaux, potasse et magnésie), avec une tension telle que le gypse est remplacé par de l'anhydrite, etc. La température influant directement sur la production des différents sels, on peut, dans une certaine mesure, rattacher aux variations des saisons, suivant la croyance populaire, les alternances de sel gemme et d'anhydrite, si fréquemment répétées à Stassfurt et dont il sera question plus loin.

Pour Van't Hoff, le fait que l'anhydrite perd un peu de sa solubilité avec la température, tandis que celle du sel gemme augmente, suffit à montrer que l'anhydrite a dû se déposer au printemps avec la température croissante, le sel gemme à l'automne quand elle décroissait.

En restant toujours dans le domaine chimique, il faut encore envisager les réactions secondaires, qui ont modifié certains sels après leur dépôt par dédoublement, etc.

L'un des cas les plus intéressants à cet égard est celui du sulfate de chaux. Suivant les conditions de température et la proportion des sels coexistant dans l'eau avec le sulfate de chaux, on a, soit du gypse, soit de l'anhydrite. Dans le cas ordinaire d'une eau renfermant des chlorures, le précipité au-dessus de 25° est déjà de l'anhydrite et non du gypse. Avec une eau douce, il se dépose, au contraire, du gypse jusqu'à 60°.

Ultérieurement, des effets d'un métamorphisme inverse ont pu transformer l'anhydrite en gypse, ou le gypse en anhydrite. L'hydratation des masses d'anhydrite s'opère avec une très grande rapidité quand ces masses sont mises à nu, comme cela arrive dans certains tunnels alpins, où il en résulte de sérieuses difficultés. L'anhydrite absorbe un quart de son poids d'eau et se gonfle en augmentant d'un tiers de son volume.

Géologie des gisements salins. — Je passe maintenant aux interventions d'ordre géologique. Celles-ci, qui ont pour nous un intérêt tout particulier, ont pu se réaliser, soit pendant, soit après le dépôt ; et la forme actuelle du gisement en est la conséquence.

¹ On sait que cette tension de vapeur a un rapport direct avec la concentration de la dissolution.

Envisageons d'abord les *phénomènes contemporains du dépôt*. Il suffit d'examiner un grand gisement de sel pour comprendre qu'une simple évaporation dans un vase limité et fixe, même avec des variations de température, est absolument insuffisante pour rendre compte de certains phénomènes observés et que, pour d'autres, il y a tout au moins lieu à une discussion très serrée.

Le premier phénomène, où l'on est forcé de faire intervenir l'orogénie, est l'épaisseur extraordinaire de certaines couches salines. Le cas de Sprenberg, où l'on est resté pendant 1200 m. dans le sel, est remarquable; mais 2 ou 300 m. de sel à peu près continus sont fréquents. Or, avec de l'eau à environ 3 p. 100 de chlorure de sodium, pour en produire 30 kg. qui, répartis sur un mètre carré avec une densité de 2,2, occuperaient 1,4 cm. d'épaisseur, il faut un mètre de hauteur d'eau. 280 m. de sel supposeraient donc 20 km. d'eau : profondeur double des plus grandes profondeurs océaniques actuelles et sous laquelle on ne saurait imaginer l'évaporation d'une telle masse commençant à se produire, d'autant plus que la pression, dans ces proportions, augmente sensiblement la solubilité au bas de la colonne. En outre, on se trouverait amené à admettre, postérieurement au dépôt, un soulèvement du fond ayant au moins compensé cette profondeur énorme dont il avait fallu supposer la mer primitivement creusée.

Il faut donc que l'évaporation progressive ait sans cesse été compensée par des apports nouveaux d'eau saline. Nous verrons bientôt quelles hypothèses on peut faire à cet égard.

L'autre difficulté, pour laquelle la chimie fournit en partie la solution, tient à certaines alternances et successions anormales, en même temps qu'à l'apparition de minéraux, pour lesquels une assez forte température aurait semblé devoir être nécessaire. Nous avons déjà examiné tout à l'heure le cas ordinaire des alternances dont nous trouverons des exemples si remarquables pour l'anhydrite et pour la polyhalite à Stassfurt. Il semble inutile, dans ce cas particulier, de faire intervenir des phénomènes géologiques, qui auraient dû être trop multipliés et trop régulièrement répétés pour être vraisemblables. On a pensé plutôt à invoquer des changements périodiques de température et de pression, très simplement (trop simplement peut-être) rattachés à des variations annuelles, et qui peuvent, en réalité, correspondre à des périodes météorologiques beaucoup plus prolongées. On peut également faire intervenir, en dehors de la température seule, les apports des cours d'eau dans la lagune en évaporation : apports variables avec les périodes ou avec les saisons. Quant aux cristallisations nécessitant des conditions de température supérieures, d'après ce que nous connaissons, à la température normale, il ne faut pas oublier l'influence, si bien étudiée par Van't Hoff, des mélanges salins sur la cristallisation des sels et les résultats obtenus dans une dissolution saturée en chlorure de sodium. Avec des bains de saumure susceptibles de fournir ces immenses masses de sels et dans les conditions de lenteur qui ont pu présider à des phénomènes naturels, toutes les cristallisations peuvent devenir facilement explicables sans qu'on ait besoin d'imaginer, comme on le faisait trop volontiers autrefois, des températures anormales. Il n'en est pas moins vrai qu'à côté des successions de minéraux

conformes à la théorie et des alternances réitérées comme celle du gypse et du sel, certains gisements gypso-salins montrent des récurrences beaucoup plus amples, pour lesquelles nous n'avons aucune raison de repousser l'intervention d'un mouvement du sol et d'une influence extérieure sur la salure, étant donné que de tels changements sont très généralement indiqués par toutes les sédimentations.

Revenons donc à l'*explication des grandes épaisseurs salines*. La théorie classique à cet égard est celle de la « Barre », imaginée par Bischof, développée par Ochsénus et si connue aujourd'hui qu'il suffit de la rappeler en quelques mots. Si l'on imagine un bassin fermé contigu à une mer plus vaste et communiquant avec elle par un détroit peu profond, dont le fond forme seuil sous-marin ou barre, un commencement d'évaporation sur le bassin fermé doit nécessairement amener la descente des eaux plus chargées de sels, donc l'impossibilité pour elles de retourner vers la mer dont elles sont séparées par la barre, tandis que le vide résultant est comblé au-dessus par un apport de nouvelle eau de mer superficielle. Ainsi doit progressivement s'augmenter la salure du bassin jusqu'au moment où, quelle que soit son épaisseur, l'évaporation s'y réalise et le sel s'y précipite. Ce sel ayant, en réalité, une origine illimitée dans la mer voisine, peut ainsi remplir un bassin fermé avec une épaisseur infiniment supérieure à celle qu'aurait comportée l'épaisseur d'eau initiale. À l'appui de cette théorie, on a cité le Karabogaz à l'Est de la Caspienne, les étangs du Delta du Rhône, etc. Néanmoins, dans ces dernières années, cette théorie, si séduisante qu'elle soit, a été battue en brèche par les observations d'Androusov qui, reprenant l'étude du Karabogaz, a montré l'absence de dépôts salins sur son fond, mais a pourtant constaté un courant superficiel permanent de la mer Caspienne vers cette baie. On n'a rien trouvé non plus de semblable à une barre au voisinage des grands bassins salins géologiques. On a été alors conduit à invoquer, comme une condition essentielle, la présence d'un climat désertique avec apport d'eaux légèrement salines vers une lagune fermée.

En toute hypothèse, nous serions très portés à imaginer un approfondissement progressif des bassins de concentration, soit isolés dans les terres, soit reliés à la mer : ceux-ci ayant déjà commencé à s'isoler par un premier phénomène orogénique, d'où la concentration a résulté. Ces zones déprimées tendent à se déprimer de plus en plus et nous en avons des preuves dans bien des dépôts lacustres ou littoraux. Il est difficile d'expliquer autrement les grandes épaisseurs continues de formations, comme celles du Gondwana ou du Karoo. Ce qui s'est passé sous une autre forme pour les géosynclinaux destinés à se plisser s'est produit également pour les bassins de sédimentation plus larges à fond tabulaire, sièges des évaporations salines : bassins dont le fond a dû s'enfoncer progressivement à mesure que le dépôt s'y faisait, peut-être avec des arrêts d'où résulteraient bien des anomalies.

Passons aux *mouvements postérieurs*. Une fois le gisement formé, on doit, toutes les fois qu'il s'agit d'un corps soluble comme le sel gemme ou le gypse, encaissé dans des terrains qui ont été soumis à des efforts orogéniques, envisager un phénomène qui a joué un grand rôle dans l'allure actuellement présentée par les gisements de ces substances. C'est celui

qui amène le gypse, le sel ou la glace à se mouler progressivement sous la pression, à prendre des déformations, parfois très considérables, sans rupture. Cela tient à ce que, dans un mélange de masses semi-solides et semi-liquides, les parties solides comprimées ont un coefficient de solubilité supérieur à celui des parties non comprimées. Au voisinage des vides qui tendent à se produire, il se fait alors un commencement de dissolution amenant une sursaturation, par laquelle un nouveau corps cristallisé remplit ce vide et, progressivement, il se développe, sous une forme nouvelle, une matière homogène. Les formes compliquées de nombreux gisements salins ou gypseux, qui ont pu autrefois faire imaginer des intrusions éruptives, sont dues à ce phénomène¹.

2° GITES SÉDIMENTAIRES ET STRATIFORMES

Hypothèses diverses sur les minerais stratiformes. — Y a-t-il des minerais sédimentaires de précipitation chimique et quelle est leur proportion relative dans l'ensemble des gisements à allure stratiforme, ordinairement réputés sédimentaires, tel est le problème qui se pose maintenant à nous : problème rendu très difficile par les transformations ultérieures que ces gisements stratiformes ont, en tout cas, pour la plupart, subies, au point d'avoir complètement perdu leur physionomie primitive. Pour préciser par quelques exemples bien typiques, nous devons chercher s'il faut considérer comme sédimentaires, les poudingues aurifères du Witwatersrand, les grès plombifères de la Prusse Rhénane, les schistes cuprifères du Mansfeld, les gisements plombo-zincifères de Silésie, les minerais de fer toarciens de Meurthe-et-Moselle, les manganèses du Caucase... Dans la plupart de ces cas (qui ne présentent d'ailleurs aucune solidarité et pour lesquels nous adopterons des solutions différentes), la question est de nature à surprendre au premier abord les géologues, auxquels l'allure de ces gisements est familière ; car il s'agit de minerais occupant, sur une grande étendue, un ou plusieurs niveaux constants dans une série sédimentaire déterminée et se présentant, par conséquent, exactement dans les mêmes conditions que les autres sédiments quelconques encaissés dans les terrains. Cette grande extension d'une formation relativement homogène occupant un niveau constant (parfois, comme dans le cas du Mansfeld, un niveau très mince), est évidemment une forte objection à l'idée d'une introduction ultérieure épigénétique ayant un caractère de filon-couche, et l'on s'est généralement arrêté à une telle objection immédiate pour se fier aux apparences premières. Cependant la difficulté, si sérieuse qu'elle soit, ne paraît pas, à elle seule, insoluble en utilisant la comparaison avec les eaux souterraines actuelles, que l'on doit avoir constamment présente à l'esprit en métallogénie et il en résulte une incertitude portant sur des gisements nombreux, qui va nécessiter une discussion approfondie.

Par exemple, comme nous l'avons dit déjà à propos des filons-couches, sans recourir aux phénomènes de profondeur à température relativement

¹ Voir, au tome II, les figures relatives à Maros Ujvar, Szlatina, etc.

élevée et sous forte pression, si nous envisageons simplement le cas de ce qu'on appelle improprement la « nappe » des sables verts, nous savons que, à partir de l'Ardenne et sous toute l'étendue du bassin de Paris, dans un certain niveau déterminé, il existe des eaux abondantes, sinon partout et régulièrement comme on l'a dit à tort, du moins dans de très nombreux interstices, vides et fissures. Ces eaux sont loin d'être pures ; elles renferment, au contraire, comme le montre l'analyse des puits artésiens de Paris, une teneur en sels de 141 mgr. par litre, dont 41 p. 100 de carbonate de chaux, 14,4 de carbonate de potasse, 11,5 de carbonate de magnésie, 6,4 de chlorure de sodium, du sulfate de soude, de la silice, etc. En plus petit, dans tout le bassin de Vichy Saint-Yorre, à des niveaux bien connus, les sables perméables du tertiaire comprennent des eaux chargées abondamment d'acide carbonique et de bicarbonates maintenus en dissolution. C'est un peu de cette manière que l'on est en droit de se représenter la possibilité d'un phénomène hydrothermal, alimenté cette fois en sels métallifères par une des causes quelconques qui introduisent les métaux dans les fractures filoniennes et portant sur toute une strate, qui se sera trouvée imprégnée d'eaux salines, baignée dans ces sels, jusqu'au moment où la précipitation simultanée de ceux-ci aurait eu lieu à la fois sur une vaste étendue et aurait produit ainsi un dépôt homogène. La pression artésienne aurait été assez forte pour permettre l'introduction des eaux, sur de larges espaces, dans des circuits minces et presque capillaires.

Nous avons également envisagé¹ la possibilité que des eaux métallifères aient pénétré par en haut dans un sédiment resté meuble et non encore enfoui sous l'épaisseur des dépôts ultérieurs : cette pénétration ayant pu se réaliser, soit dans le cas d'un bassin de sédimentation devenu peu profond, où les eaux se seraient concentrées, soit même, après émergence momentanée de ce sédiment, dans une zone désertique.

Ces deux hypothèses, et d'autres encore peut-être, ne permettent pas de repousser dans tous les cas l'idée d'une venue épigénétique ainsi entendue, sachant surtout, comme nous l'avons montré dans un chapitre antérieur², combien sont fréquents les cas de filons-couches incontestables, ayant pris les allures les plus diverses. En fait, parmi les exemples que nous avons cités plus haut, il en est, comme les gisements silésiens, pour lesquels nous admettrons l'idée d'une venue nettement postérieure et, pour la plupart des autres, nous croyons que la précipitation du minerai n'a pas été rigoureusement contemporaine du dépôt, mais s'est produite un peu après par en haut, dans les conditions que nous venons de rappeler.

Un argument puissant en faveur, sinon d'une venue entièrement filonienne, du moins d'une remise en mouvement notable ou d'une pénétration métallifère latérale, est donné par la fréquence des fossiles transformés en minerai et enveloppés de minerai qu'on rencontre dans beaucoup de ces dépôts. Il semble évident que, lorsqu'on trouve un fossile converti en pyrite ou en chalcopryrite, dans un terrain lui-même pyritisé,

¹ Page 207.

² Page 116.

l'animal qu'il représente n'a pas vécu dans un milieu saturé à ce point de sulfures métalliques. Mais, si l'argument est excellent lorsqu'un fossile pyritisé se rencontre dans un amas de pyrite, il a moins de valeur pour une couche mince comme celle du Mansfeld. Rappelons-nous, en effet, ce qui se passe quand un organisme tombe sur un fond vaseux dans un milieu aquifère contenant de faibles proportions de sulfure de fer. Ce sulfure de fer se concentre sur l'organisme, qui apparaît pyritisé. Dans une vase entièrement imprégnée d'hydrocarbures, il a pu ainsi, se réaliser, par un phénomène immédiatement consécutif de la sédimentation, une mince strate métallisée. C'est pour résoudre une difficulté semblable que l'on a invoqué autrefois des phénomènes éruptifs sous-marins, des dégagements contemporains d'eaux métallisantes, auxquels, avec un peu d'imagination, on a même pu attribuer la mort des poissons contenus dans la couche cuprifère du Mansfeld et leurs contorsions de souffrance. De telles explications, sans être nécessairement à repousser, ne doivent être énoncées qu'à la dernière extrémité, étant donné que, progressivement, au fur et à mesure de nos progrès, le nombre des gisements, pour lesquels on est forcé de recourir à elles, devient de moins en moins considérable.

De même, les fossiles sont abondants dans les minerais de fer sédimentaires ; ils y sont même particulièrement abondants. L'aspect des mines de Meurthe-et-Moselle, aussi bien que celui de nos gisements ferrugineux bajociens du centre de la France, sont tout à fait typiques à cet égard. Mais là le problème se pose un peu différemment. Tandis que, pour les poissons du Mansfeld, il fallait, dans l'hypothèse sédimentaire, supposer une pyritisation immédiate avant la décomposition de la matière organique destinée à jouer le rôle d'agent précipitant, pour des coquilles, des bryozoaires, etc., on peut aisément imaginer un séjour relativement long sur le fond de la mer, ayant donné à la composition de celle-ci le temps de se modifier, avec accentuation de la teneur en fer. De plus, on ne voit même pas qu'une teneur en fer susceptible de produire de semblables gisements soit exclusive de la vie. La présence d'une coquille hématisée n'est donc pas la preuve absolue d'une venue épigénétique ; mais dans certains cas, l'examen de détail montre sans aucun doute que l'hématisation, comme la pyritisation des organismes, a eu lieu après coup, soit dans la même phase géologique, soit dans une phase postérieure, par un apport ferrugineux d'origine plus ou moins lointaine.

D'autre part, malgré toutes les études actuelles d'océanographie ou de limnographie, nous ne voyons, dans aucun bassin de sédimentation, se produire, sous nos yeux, des gisements de fer, de manganèse, de pyrite ou de chalcopryrite analogues à ceux qui semblent occuper dans nos terrains des strates sédimentaires. Ce n'est pas non plus une démonstration de leur origine intrusive et épigénétique quand nous les rencontrons en métallogénie. Nous ne saurions avoir la prétention que la superficie terrestre actuelle nous offre des spécimens de tout ce qui a pu se réaliser dans l'histoire géologique. Cependant, lorsqu'un tel point de comparaison nous manque, nous nous sentons un peu incertains devant des hypothèses invérifiables et nous devons y regarder de près.

Sédimentations métallifères actuelles. — Comme faits actuels, voici à quoi se bornent à peu près les observations relatives aux sédimentations métallifères, si nous laissons de côté les remises en mouvement de gisements antérieurs déjà étudiées.

La *pyrite de fer* se produit fréquemment dans les vases marines littorales quand des sulfates, tels que le gypse, avec des matières organiques susceptibles de les réduire, se trouvent en présence d'oxydes de fer. La tourbe de nombreux gisements, les arbres submergés recueillis à marée basse à Cherbourg et provenant de forêts englouties depuis la période historique, les vases de Saint-Malo, celles de l'anse de Toulven au Sud de Quimper et celles de la Bièvre à Paris en renferment fréquemment¹.

On s'explique ainsi l'abondance des fossiles pyritisés, ou des rognons et boules de marcassite dans le secondaire. Le fait que la pyrite abonde dans les sédiments à facies vaseux et manque dans ceux à facies oolithique ou corallien est bien en faveur d'une origine contemporaine. Dans le houiller, l'abondance de la pyrite s'accroît en rapport avec celle des matières organiques qui ont pu déterminer la réduction des sulfates. On trouve, par exemple, à Commeny (Allier), des troncs d'arbres fossilisés dont l'axe est en pyrite, et nous pourrions retenir ce fait quand nous parlerons des gisements cuprifères échelonnés le long de la chaîne hercynienne d'Europe. De même les cristaux de pyrite abondent dans certains schistes ardoisiers. Néanmoins, il faut, dans ce dernier cas, accentuer une réserve, à laquelle prêtent déjà certains gisements de pyrite houillère. Dans la plupart des cas, la pyrite du houiller tapisse des diaclases, des fissures de la houille ou des grès houillers, forme de minces placages, etc., et laisse donc supposer au moins une remise en mouvement, sinon une introduction ultérieure.

Quelquefois, dans des cas assez problématiques, cette pyrite s'accompagne d'autres sulfures métalliques.

La *sidérite*, qui abonde, on le sait, dans les terrains houillers, est, très fréquemment chargée de tels minerais. A Ronchamp, dans la Haute-Saône, on y trouve des nids de galène, blende, pyrite et barytine. A la mine du Treuil dans la Loire, la sidérite, en couches régulières alternant avec des couches de houille, contient les mêmes éléments. On les retrouve encore à Palmesalade, dans le Gard, avec une telle abondance qu'on a pu, dans ce cas particulier, étant donné de plus l'aspect spécial de cette sidérite, croire à un gisement filonien.

Sauf dans ces cas particuliers, où interviennent des réducteurs organiques généralement en rapport avec le voisinage des côtes, les sédiments sont des produits oxydés et hydratés. Ce qui y domine, c'est l'argile, le carbonate de chaux ou de magnésie, la silice. On y trouve aussi, dans les profondeurs marines, au delà de 4 000 m., au milieu d'une argile rouge produite par l'altération des produits volcaniques, des zéolithes et une abondance remarquable de *nodules manganésifères* allant depuis des grains microscopiques jusqu'à de grosses concrétions. Cette présence des oxydes de manganèse, qui se produit également sur certains points quand on se rapproche des côtes, concorde avec ce que nous

¹ Voir LACROIX. *Min. de la France*, t. II, p. 616; t. 3, p. 619.

avons dit plus haut sur la facile exsudation de ce corps sous des réactions oxydantes et sur son isolement, même quand il n'a commencé à exister qu'à l'état de traces. Quant au fer, isolé dans les mêmes conditions et provenant de la même source, il est surtout, dans ce cas, à l'état de glauconie (hydrosilicate de fer ou d'aluminium et de potasse). Pour trouver des dépôts directs de limonite, il faut envisager les formations produites sous très faible épaisseur d'eau dans les lacs et les marais.

Étant ainsi en présence de nombreux cas (examinés dans un chapitre antérieur), où il y a certainement filon-couche et venue épigénétique, puis de quelques autres où la sédimentation a été immédiatement métallisée, pour trancher le problème posé dans les cas intermédiaires, nous recourons aux éléments d'observation qui vont être groupés dans le paragraphe suivant.

Éléments d'observation et de discussion géologiques. — 1° Il est évident qu'une métallisation est postérieure à un terrain quand elle le recoupe transversalement, en pénétrant même dans les terrains voisins, surtout lorsque ceux-ci sont d'un âge postérieur au principal niveau imprégné. C'est le caractère des filons proprement dits, qui se retrouve souvent, quand on regarde de près, sur certaines parties des filons-couches à l'apparence la plus décevante. De même, le principal argument de ceux qui croient les schistes cuprifères du Mansfeld épigénétiques est l'enrichissement qu'ils croient souvent constater à la rencontre de certaines failles, ou rücken, assimilés par eux à des filons générateurs. Il faut toutefois, nous l'avons déjà dit, ne pas se laisser induire en erreur par des remises en mouvement qui auraient pu, partant du gisement déjà constitué, remplir, longtemps après, des fractures transversales, ou, amenant des eaux de surface par ces failles, exercer une action de cémentation sur les minerais préexistants. C'est un genre d'erreur dans lequel on est tombé bien souvent autrefois, alors que l'attention n'était pas encore suffisamment appelée sur ces remises en mouvement. Les prétendus « griffons » du Laurion en sont un exemple. Souvent on a pris ainsi, pour des chenaux d'arrivée des zones métallisantes, pour des « failles nourricières », etc., des fractures postérieures ayant, ou bien emprunté leur remplissage au gîte préexistant, ou même, comme on a pu le supposer, dans une autre hypothèse, pour les « rücken » du Mansfeld, servi de champ d'incrustation à des dissolutions métallifères nouvelles d'origine profonde, sans relation avec celles qui avaient constitué le gîte primitif. En fait, c'est une remarque essentielle pour les grands gisements stratiformes sur lesquels a porté la discussion, il en est un certain nombre, et notamment la plupart de ceux encaissés dans les calcaires, qui viennent s'intercaler dans un ensemble filonien auquel ils paraissent, dès lors, se rattacher. Il en est d'autres, au contraire (pour lesquels, par d'autres raisons, nous supposons une formation sédimentaire ou par voie descendante), dans lesquels on n'a jamais découvert un seul filon net et continu en profondeur, un filon exploitable par lequel auraient pu venir d'en bas les eaux métallisantes.

2° On trouve souvent, dans une zone géographique déterminée, des métallisations ou des minéralisations affectant des terrains d'âges variés,

alors que ces mêmes terrains ne sont pas minéralisés ou métallisés dans les régions voisines. La probabilité est alors pour que cette métallisation soit intrusive. Mais cette observation, elle aussi, n'est pas, disons-le, démonstrative à elle seule. On sait, en effet, que certaines zones terrestres, comme les géosynclinaux, ont été marquées par une succession de mouvements qui s'y sont reproduits à diverses époques, et l'on pourrait imaginer quelque chose de semblable pour ces zones métallifères : une répétition de sédimentations métallifères provoquées par le renouvellement des mêmes conditions de dépôt.

Il n'est probablement pas permis d'assimiler à cette possibilité de métallisations successives dans un même point la constatation fréquente que, sur la longueur d'une chaîne plissée, les manifestations métallifères analogues ne sont pas partout rigoureusement du même âge. Cette différence d'âge peut ne pas exclure l'unité du phénomène. Supposant ces phénomènes sédimentaires et connexes, on est, en effet, en droit d'imaginer un faible déplacement dans le temps, qui aurait accompagné leur déplacement dans l'espace.

3° On doit attacher une grande importance, dans cette étude, à la *nature des sédiments métallisés*. Car, dans toute hypothèse, il n'est pas admissible qu'un calcaire, un schiste et un grès aient donné lieu à une métallisation identique, et le type de cette métallisation, rapproché de la nature du terrain encaissant, peut être instructif. La manière la plus simple dont nous nous représentons une métallisation sédimentaire est l'arrivée, dans le bassin de sédimentation, de substances métallifères empruntées par l'effet de l'érosion à des terrains, roches ou surtout filons préexistants : cette arrivée ayant pu avoir lieu par simple transport mécanique à la façon des placers, ou par dissolution chimique, comme dans les cas actuels des minerais de fer des marais ou des nodules manganésifères des fonds marins. La nature des sédiments métallisés, calcaires, grès, conglomérats, schistes, etc., qui implique certaines conditions de dépôt, rend une telle hypothèse plus ou moins vraisemblable et peut, au contraire, plus ou moins porter à admettre une métallisation intrusive.

Nous sommes, par exemple, et c'est un point sur lequel nous allons revenir à propos des organismes, peu disposés à imaginer une métallisation sulfurée contemporaine quand le terrain imprégné est un calcaire, formé, ou par des organismes constructeurs, ou par des accumulations de débris organisés dans les zones déjà profondes et calmes des mers. L'idée même d'une éruption sous-marine, à laquelle on a parfois pensé en un tel cas, ne se concevra guère sans autres traces de son passage, montées de roches, pulvérisation de cinérites, etc.¹ Or c'est bien souvent dans des calcaires que l'on a trouvé de soi-disant niveaux métallifères, sulfurés à l'origine, qui, pour nous, tiennent d'ordinaire à la façon particulièrement favorable dont certains bancs de calcaire poreux se sont prêtés à l'imprégnation, notamment le long de leur contact avec d'autres strates imper-

¹ L'idée, trop facilement admise autrefois, de sources métallisantes débouchant au fond d'une lagune ou d'un lac pourrait être également invoquée dans certains cas très particuliers.

méables. Et la plupart de ces cas nous paraissent être à séparer, presque sans hésitation, des sédiments pour être rattachés aux substitutions.

Ainsi, le contact d'une couche imperméable; comme un schiste ou un porphyre, avec un calcaire, donne lieu à de nombreux gisements formant des niveaux métallisés. La prédominance des conditions physiques nous semble ici exclusive d'une sédimentation contemporaine, bien qu'il ne soit évidemment pas impossible d'imaginer telle phase d'un cycle de sédimentation, particulièrement propice aux sédimentations métalliques, qui se serait intercalée logiquement entre un calcaire et un schiste. Le fait que le calcaire, tout en étant de préférence au-dessus, se trouve pourtant parfois aussi au-dessous dans le même gisement, rend cette dernière explication difficile.

En revanche, nous nous représentons assez facilement une précipitation métallifère s'opérant dans les eaux vaseuses où se déposaient des argiles destinées à former des schistes, et l'on peut également concevoir une autre forme de sédiments métallifères d'origine purement mécanique se déposant avec des sables ou des conglomérats, ainsi qu'on le voit constamment se produire sous nos yeux pour l'or, le platine, l'étain, etc., à l'état d'alluvions. L'idée d'un ancien placer métamorphisé par retour en profondeur est une de celles que l'on a pu soutenir avec le plus de vraisemblance pour le Witwatersrand.

Mais, dans le cas des grès et conglomérats comme dans celui des schistes, l'hypothèse d'une épigénie postérieure peut être également plausible dans d'autres cas, surtout quand les minerais sont localisés en plan horizontal dans un rayon restreint avec roches éruptives connexes et lignes de dislocations. C'est ainsi que nous admettrions volontiers une telle épigénie pour les minerais cuprifères du Lac Supérieur, de New Jersey et du Boleo, tandis que nous décrirons plus tard de nombreux gisements hercyniens où le cuivre nous semble à peu près contemporain des grès encaissants.

Pour de telles formations de grès et conglomérats, il est également permis, suivant une hypothèse signalée plus haut¹, de penser à une pénétration de haut en bas, opérée chimiquement dans des conditions de concentration désertique ou lagunaire. Il y aurait eu, sur un fond de sables ou galets encore meubles, évaporation et précipitation d'eaux métallifères. La coexistence fréquente du gypse et du sel avec les dépôts cuprifères, la réduction manifeste de ceux-ci par des dépôts végétaux nous paraissent des arguments puissants en faveur d'une hypothèse sédimentaire ainsi comprise.

⁴ Nous avons déjà dit à quelles interprétations variées pouvait donner lieu la présence d'*organismes ultérieurement métallisés* dans une couche de minerais². Il semble d'abord difficile que des organismes aient pu vivre dans une eau renfermant assez de sels métalliques pour constituer un dépôt utilisable de ceux-ci, si mince qu'on le suppose. Comme nous l'avons rappelé, ce n'est pourtant pas impossible, puisqu'il se forme

¹ Page 207.

² On trouve de tels organismes aussi bien au Rammelsberg ou au Mansfeld que dans les minerais de fer de Normandie et de Lorraine:

chaque jour du sulfure de fer sur des débris organisés dans une eau où vivent des poissons ou des mollusques qui n'en sont nullement incommodés. Les dissolutions susceptibles d'amener une précipitation métallique sur un corps réducteur ou poreux n'ont aucun besoin d'être concentrées, comme on le croirait d'abord, mais peuvent, au contraire, être extrêmement diluées pour se précipiter par des réactions très lentes et très prolongées, dont le rôle a dû, ici comme partout, être énorme en métallogénie. Des poissons ou des débris de plantes tombés sur un fond de vase, des hydrocarbures disséminés dans cette vase ont pu ainsi servir de centres d'attraction à des sulfures qui ont constitué des nodules ou des délits métallifères. Le cas assez fréquent de restes organisés dans les dépôts gypseux, pour lesquels la sédimentation directe n'est pas douteuse, amène à concevoir toute une série de phénomènes accessoires, courants, couches superposées de salure et de densité différentes, qui ont pu également intervenir ici.

Peut-être est-il plus difficile d'expliquer de la même manière les couches de minerai de fer où l'on retrouve, dans le minerai, les traces d'organismes ou d'oolithes calcaires ; mais il est visible, pour la plupart de ces minerais de fer, qu'ils ont subi des réactions postérieures ayant transformé un carbonate ou un silicate de fer en sesquioxyde et ayant alors concentré ces sels de fer tout d'abord disséminés. Ces réactions ont pu aisément être accompagnées d'un léger déplacement, dans lequel le fer se serait substitué à des terrains et organismes calcaires juxtaposés.

5° Malgré les explications possibles dont nous venons de dire un mot, il est certain que beaucoup de gisements, où l'on est d'abord frappé par une disposition interstratifiée, et notamment tous ceux qui forment des amas associés avec des calcaires, présentent, au contraire, quand on les examine d'un peu plus près, une série de caractères propres à les faire considérer comme dus à une métallisation postérieure. Et cette explication filonienne serait presque partout, dans les schistes, les grès, la plus naturelle, si l'on ne rencontrait, d'autre part, une singulière difficulté à se représenter une métallisation postérieure pénétrant, injectant après coup, sinon uniformément, du moins avec une certaine constance moyenne, les vastes étendues d'une formation comme celles du Mansfeld, de la Lorraine ou du Witwatersrand. D'autant plus qu'aucune trace de filons ayant pu amener les métaux d'en bas ne s'y montre en général¹. Dans les cas de ce genre où l'on a un niveau métallisé d'une grande extension, nous ne voyons guère, en dehors de la sédimentation contemporaine, que les deux hypothèses indiquées précédemment et seulement applicables à des terrains poreux : ou bien une vaste circulation d'eaux souterraines, assimilable aux nappes artésiennes, mais ayant reçu une métallisation accidentelle et imprégnant une strate sableuse souterraine avant sa cimentation ; ou bien, comme nous le proposons tout à l'heure à propos des grès métallisés, dans le fond littoral, lagunaire, lacustre, fluvial, où s'était précédemment déposé un sédiment stérile encore meuble et perméable, la

¹ Nous discuterons plus tard la théorie des Rücken enrichisseurs du Mansfeld, qui correspond aux « failles nourricières » de Lorraine, ou à l'influence prétendue des dykes de diabase au Witwatersrand.

pénétration presque immédiate par en haut d'eaux métallisantes. L'idée de filons nourriciers n'ayant pas retenu eux-mêmes de minerais en dehors de la couche qu'ils auraient métallisée à des centaines de mètres de distance, nous paraît peu vraisemblable malgré le rôle précipitant qu'il est logique d'attribuer aux hydrocarbures souvent constatés dans celle-ci.

On pourrait, il est vrai, penser encore parfois (au Witwatersrand en particulier) à ces imprégnations diffuses qui semblent liées au métamorphisme régional et qui, dans bien des cas, semblent avoir produit des veines pyriteuses interstratifiées, comme elles déterminaient ailleurs des feldspathisations. Mais le genre de gisements qui résultent d'un tel phénomène nous paraît différent de ceux qui nous occupent en ce moment. Il semble qu'il ait plutôt alors une tendance à se localiser en amas, stockwerks, réseau de veinules accumulées sur un même point qu'à suivre, sur plusieurs kilomètres carrés, un ou plusieurs mêmes bancs stratigraphiques. Nous avons rattaché volontiers à ce phénomène de profondeur les cas de terrains à plis intérieurs multiples, injectés de sulfures métalliques dans tous leurs bâillements (Ammeberg, etc.) : cas où l'on a parfois voulu voir la preuve incontestable d'une métallisation contemporaine. Nous avons plus de mal à nous imaginer ainsi la métallisation du Mansfeld ou du Witwatersrand.

6° Il est à remarquer que, dans plusieurs des grands bassins métallisés, pour lesquels l'origine intrusive est tout au moins douteuse (Witwatersrand, Lorraine, etc.), la métallisation porte, non sur une couche unique, mais sur un *système de couches parallèles* disposées par lentilles, chevauchant les unes sur les autres en coupe verticale. On ne saurait, comme nous allons le dire, en tirer une conclusion rigoureuse.

S'il y a eu sédimentation directe, il a dû y avoir retour réitéré des mêmes conditions propres à la précipitation des minerais, comme, dans toute série stratigraphique complexe, le retour des mêmes catégories de terrains implique un nouveau cycle de sédimentation analogue. S'il y a eu pénétration postérieure, on peut admettre la précipitation spéciale des minerais dans les strates, où les sédiments présentaient antérieurement (par un retour analogue) les conditions propices à cette fixation métallifère. Ainsi, au Witwatersrand, où les couches de conglomérats à galets moyens sont les plus riches, cela peut s'interpréter, aussi bien par les conditions de la préparation mécanique qui, avec les galets de grosseur moyenne, a provoqué la plus grande concentration d'un or détritique, ou par les dimensions des vides laissés par les galets qui, dans de telles couches, se sont trouvés particulièrement favorables à la cristallisation des intrusions aqueuses métallifères, celles-ci étant d'ailleurs venues ou d'en haut ou d'en bas.

7° Nous n'avons établi, jusqu'ici, aucune différence suivant la *nature du métal* qui forme la métallisation. On peut se demander s'il y a un lien entre cette nature et la forme, et, par conséquent, l'origine possible du dépôt. En fait, dans les grès ou poudingues métallisés pour lesquels la théorie sédimentaire peut être soutenue, nous trouvons, tantôt de la pyrite aurifère comme au Transvaal, tantôt de la pyrite cuprifère dans une foule de cas étudiés plus loin, plus rarement du plomb associé au cuivre, un peu de cobalt (Wallerfangen, etc.), peu de zinc et de nickel. Dans le seul

cas de schistes où la métallisation semble contemporaine, au Mansfeld, nous avons les mêmes métaux, fer, cuivre, argent, cobalt, etc. Le zinc et le plomb ne s'y développent que dans des cas, comme celui d'Ammeberg, en Suède, où nous n'hésitons guère à admettre une métallisation postérieure due au métamorphisme régional. Dans les calcaires, où nous croyons de préférence à une intervention filonienne, on aura, au contraire, surtout du plomb, du zinc ou du fer, rarement du cuivre ou du nickel.

8° En ce qui concerne l'âge des formations métallifères stratiformes, si nous laissons de côté les calcaires métallisés, qui, pour nous, l'ont été presque partout postérieurement, et dans lesquels la substitution est souvent évidente, ou encore les sédiments ferrifères dont les conditions de formation sont spéciales, on voit en Europe ces minerais stratiformes se localiser en deux groupes : l'un surtout marqué par des dépôts à apparence de précipitation chimique ayant pu être contemporaine ou un peu postérieure, avec rôle prédominant du cuivre, le long de la chaîne hercynienne dans le permotrias ; l'autre caractérisé par des préparations mécaniques certainement sédimentaires, dont l'or fournit le meilleur spécimen, le long de la chaîne alpestre, depuis la Sierra Nevada jusqu'à la haute Italie et à la Serbie¹. Cela ne veut pas dire qu'il n'y ait pas déjà, dans la série hercynienne, quelques indices de sédimentation mécanique, comme les poudingues aurifères du Gard, les poudingues plombifères du Cap-Garonne, etc. ; mais la plupart des minerais qui se seront formés alors ainsi, étant continentaux, ont dû être amenés à disparaître par une érosion plus rapide. Et, dans les zones de plis tertiaires, il est possible également qu'il se soit produit des dépôts chimiques cuprifères analogues à ceux des zones hercyniennes, dépôts dont on voit des traces en divers points de l'Amérique, en Sardaigne, etc. Mais les conditions de précipitation, qui ont amené la grande abondance de ces minerais cuprifères dans le permotrias, ne semblent pas encore s'être réalisées dans la période tertiaire, ou leurs effets n'y sont pas encore visibles : ce qui peut expliquer comment nous n'assistons nulle part à une importante formation cuprifère contemporaine.

Quand on examine spécialement une zone métallisée, telle que la zone hercynienne d'Europe et ses minerais cuprifères, on constate que les niveaux métallisés ne sont pas partout rigoureusement synchroniques. Ils ne le sont même pas (comme on l'a parfois prétendu à tort) dans un bassin localisé tel que celui du Mansfeld. Nous venons d'ailleurs de rappeler qu'en un même point, il y avait généralement (sinon dans le cas du Mansfeld, du moins dans la plupart des autres), plusieurs niveaux métallifères superposés, dont l'âge était, par conséquent, nécessairement différent. Même en tenant compte de cette restriction, la relation entre les métaux et la série permotriassique est toute naturelle dans l'hypothèse d'une métallisation contemporaine, tandis qu'elle serait singulière dans une hypothèse contraire. On peut admettre que, durant cette période spéciale, une cause particulière, telle que la destruction des filons métallifères

¹ Nous laissons de côté les minerais très spéciaux de terrains profondément métamorphisés comme ceux de Suède.

sulfureux dans la chaîne hercynienne, précédemment surgie au voisinage, a mis en mouvement dans les eaux des quantités notables de sels métalliques. Et, suivant les points, la mise à nu de tels filons a pu se produire à des moments un peu différents; mais, néanmoins, une certaine étape approximative de l'érosion, correspondant à une certaine profondeur moyenne de cristallisation filonienne, a dû être particulièrement favorable à cette mise à nu, qui aura cessé lorsque cette zone des incrustations filoniennes aura été dépassée en profondeur, ou lorsque, sur cette chaîne aplanie, l'érosion se sera arrêtée.

Conclusions sur la formation des gîtes stratiformes. — Ainsi, lorsqu'on a exclu les filons-couches proprement dits, étudiés dans un chapitre précédent¹ et les intrusions postérieures qui, pour nous, sont les cas ordinaires dans les calcaires, les hypothèses, auxquelles on est ramené pour les minerais stratiformes les plus douteux comme origine, sont les suivantes.

1° Dans la théorie strictement sédimentaire, la constitution d'un sédiment cuprifère, tel que ceux du Mansfeld ou du permien russe, exige, à notre avis, la série de phénomènes suivants :

a) Formation de filons de cuivre, ultérieurement mis à nu par une érosion suffisamment avancée².

b) Destruction des filons et classification mécanique de leurs débris

¹ Page 116.

² On remarquera que cette théorie diffère de celle qui a parfois attribué les métaux du Mansfeld à la seule destruction des roches éruptives du bassin et que Dieulafoy a particulièrement développée dans ses travaux, en ce que je fais intervenir, comme facteur essentiel et nécessaire, une première séparation hydrothermale et ignée des métaux apportés de la profondeur par ces roches et concentrés d'abord dans les filons, avant d'être remaniés dans les sédiments. Cette hypothèse me semble indispensable pour expliquer des concentrations métalliques, qui seraient tout à fait invraisemblables s'il fallait invoquer directement les traces extrêmement minimes et en quelque sorte résiduelles de métaux constatées dans les roches elles-mêmes; étant donné surtout qu'on a tant de sédiments semblables associés aux mêmes roches et nullement métallisés.

La nécessité des filons pour former des sédiments cuprifères apparaît, par exemple, pour les lagunes autuniennes de la France centrale (Autun, Buxière, Brive) au voisinage desquelles se trouvent de nombreux porphyres dinantiens, qui ont fourni des galets à leurs conglomérats, où abondent aussi les matières hydrocarburées et où néanmoins aucun métal ne s'est précipité, le tronçon hercynien du Plateau Central étant à peu près exempt de filons de cuivre. C'est la réponse à une objection de Poszepny, qui s'étonne de ne pas trouver partout le même niveau également métallisé s'il y a eu sédimentation cuprifère contemporaine.

De même, il est remarquable que certains types tout à fait caractéristiques de formations lacustres produites, pendant de longues périodes géologiques, par la destruction d'anciens continents, — les terrains du Karoo, notamment en Afrique du Sud, — ne contiennent pas de semblables dépôts de sulfures cuprifères. Il est vrai qu'ils ne renferment pas non plus de gypse; mais alors, dans un autre ordre d'idées, pourquoi tant de bassins d'évaporation à concentration énorme de gypse et de sel ne présentent-ils pas de trace de cuivre et de plomb? C'est évidemment que la destruction des roches quelconques du rivage ne suffirait pas pour former de pareilles couches, si celles-ci ne présentaient pas de filons de cuivre. Le fer, qui se rencontre à peu près partout dans les roches, soit en silicate ou en oxyde, soit en sulfure, se retrouve aussi presque constamment dans les sédiments, à l'état de pyrite, de protosilicate ou de carbonate (plus ou moins altérés ou oxydés).

dans des torrents et des lacs, en même temps qu'une concentration chimique s'opérerait plus loin à l'aboutissement des cours d'eau dans des bassins désertiques, dans des lagunes, ou même dans la mer libre au voisinage des côtes (ces deux phénomènes, l'un mécanique, l'autre chimique, se distinguant l'un de l'autre par une inégale répartition des métaux).

c) Dans le cas de la concentration chimique, action précipitante de matières hydrocarburées réductrices ayant une origine très probablement organique¹, céméntation possible également par d'autres éléments, tels que la magnétite, ou encore intervention de microorganismes.

2° Cette première théorie sédimentaire, dans laquelle nous n'apportons comme idée nouvelle que la phase d'érosion où les minerais intérieurs de la chaîne se seraient trouvés mis à nu, pourrait subir une modification qui lèverait de nombreuses objections et qui la rendrait, à notre avis, souvent très séduisante. Au lieu d'une métallisation immédiate qui, chimiquement, apparaît impossible pour des conglomérats déposés dans des eaux troublées en mouvement violent, on pourrait supposer, comme nous l'avons déjà indiqué, une métallisation postérieure, mais presque immédiate, du sédiment encore meuble, à la suite d'une modification dans les conditions sédimentaires tenant à un mouvement du sol ou à un changement de climat, avec pénétration par en haut des liqueurs métallisantes dans ce bassin de sédimentation. L'origine des métaux resterait alors la même que dans la première théorie, et nous montrerons aisément, plus tard, qu'une théorie analogue est applicable à de nombreux sédiments ferrifères.

Enfin 3° la théorie intrusive et simplement épigénétique pourrait être retenue en admettant de vastes circulations artésiennes; mais elle nous paraît beaucoup moins vraisemblable.

On voit donc que nous interprétons beaucoup des gisements à allure stratiforme comme des cas anciens de remises en mouvement, dans lesquels des minerais, empruntés à des filons antérieurs, seraient, par une voie quelconque, venus minéraliser des sédiments.

J'ajoute que, sur les sédiments cuprifères, d'âge souvent permotriassique, des actions récentes ou actuelles se sont exercées de nouveau, tendant à les modifier et à les déplacer encore. Le résultat le plus remarquable et le plus évident de ces altérations est que, sur ces gisements, dont on n'a guère eu l'occasion, en général, d'explorer les parties profondes, les minerais sulfurés, type originel probable, sont rares, les minerais de céméntation ou les produits oxydés sont, au contraire, le cas général.

¹ Nous avons insisté plus haut, p. 145, sur le rôle métallogénique des hydrocarbures.

CHAPITRE XIII

CONSÉQUENCES GÉNÉRALES

- A. CLASSEMENT DES MÉTAUX PAR TYPES DE GISEMENTS.
B. AGE DES GITES MÉTALLIFÈRES.— PÉRIODES DE SUPERINTENSITÉ MÉTALLOGÉNIQUE.
C. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES GISEMENTS. — AURÉOLES PÉRIPHÉRIQUES AUTOUR DES CENTRES IGNÉS. — PROVINCES MÉTALLOGÉNIQUES ET TYPES RÉGIONAUX DE GITES MÉTALLIFÈRES. — APPLICATION A L'EUROPE, A L'ASIE, A L'AFRIQUE.

Ayant étudié, comme nous l'avons fait jusqu'ici, les diverses conditions que présentent les formations métallogéniques et ayant essayé d'en déduire une théorie coordonnée, nous pouvons encore, avant d'aborder les descriptions de détail dans l'ordre prévu des éléments chimiques, envisager quelques conséquences générales et nouvelles de notre théorie, dont la vérification contribue à rendre celle-ci plus plausible.

A. CLASSEMENT DES MÉTAUX PAR TYPES DE GISEMENTS

D'après toutes les observations expérimentales, la répartition des principaux métaux entre les divers types de gisements est régie par des lois qui se déduisent, d'autre part, très simplement, si l'on admet la théorie précédente, de quelques propriétés chimiques élémentaires. On retrouve ainsi, sous une forme nouvelle, une classification qui nous a déjà servi pour établir la répartition primitive des atomes :

1° Métaux pratiquement réfractaires à toute combinaison et donnant peu de sels solubles. — Gites d'inclusions à l'état natif en roches basiques (*platine, palladium, iridium*).

2° Métaux donnant, avec l'oxygène, des oxydes neutres ou acides, et présentant, pour la plupart, peu d'affinités pour les minéralisateurs, ou ayant été scorifiés sans leur intervention (*chrome, aluminium, manganèse, titane, nickel, cobalt et fer*).

3° Métaux ne se combinant qu'avec le chlore, le fluor, etc. (c'est-à-dire avec des minéralisateurs énergiques et cessant de se dégager quand la roche descend au-dessous de 500°) — Gites d'inclusions à l'état natif ou oxydé, et gites filoniens divers, localisés au voisinage immédiat d'une roche éruptive acide (*étain, bismuth, tungstène, zirconium, uranium, or*, etc.).

4° Métaux formant des sulfures doubles ou des persulfures solubles à chaud et sous pression, mais facilement reprécipités (forcés probablement de se déposer au-dessous de 150 à 200° et, peut-être même seulement au-dessous de 100°, dans le cas du mercure). — Gites sulfurés de départ

hydrothermal, avec association possible d'arsenic ou d'antimoine ; ségrégations sulfurées ; filons ; imprégnations ; substitutions, etc... (*cuivre, plomb, zinc, fer, cobalt, argent, mercure, etc...*)

5° Métaux faiblement solubles, même à la température ordinaire, à l'état de combinaisons oxydées basiques. — Gangues filoniennes (*calcium, strontium, magnésium, baryum, etc...*).

6° Métaux formant des sels presque tous solubles à froid. — Gîtes sédimentaires d'évaporation (*potassium, sodium, etc...*)¹.

Ce tableau met bien en évidence le petit nombre de réactions, qui interviennent dans la classification métallogénique dont nous avons donné plus haut les éléments.

Suivant l'ordre que nous avons déjà adopté dans l'exposition, il commence par les groupes des inclusions et des ségrégations basiques (1° et 2°), et se continue par les catégories de métaux, qui ont cristallisé avec intervention plus ou moins accentuée de dépôts hydrothermaux de plus en plus refroidis, en commençant par ceux qui ont nécessité l'intervention des chlorures à haute température (3°), pour continuer par le groupe sulfuré (4°) et se terminer par ceux, auxquels l'acide carbonique (ou, en profondeur, l'acide silicique) ont suffi (5°, 6°).

J'ai précédemment indiqué², d'après les observations faites actuellement sur les fumerolles, les températures approximatives auxquelles ont dû cesser de se dégager les diverses vapeurs métalliques, en les supposant d'abord renfermées dans un même bain de fusion : les chlorures au-dessus de 500° ; les sulfures jusqu'à 400° ; les carbures jusqu'à la température ordinaire. Ainsi qu'on l'observe dans ces fumerolles, on peut imaginer qu'après les chlorures et les sulfures, les carbures d'hydrogène ont dû prendre de plus en plus d'importance, à mesure que la température s'abaissait et c'est peut-être une des raisons, pour lesquelles, dans les gîtes de mercure, qui semblent avoir exigé la température la plus faible, leur empreinte est particulièrement manifeste³.

B. AGE DES GITES MÉTALLIFÈRES. — PÉRIODES. DE SUPER-INTENSITÉ MÉTALLOGÉNIQUE

Détermination de l'âge, ses difficultés. — L'âge géologique des gîtes métallifères est rarement déterminable directement⁴. Toutes nos déterminations d'âge étant fondées sur la stratigraphie paléontologique, il faut, en effet, pour que l'âge d'un filon soit aussitôt connu, qu'on le voie traversant un terrain A et recouvert par un terrain B immédiatement

¹ Les métaux des deux derniers groupes 5 et 6, sont, en raison de la facilité avec laquelle ils forment des bases en s'oxydant, les éléments essentiels de la scorie silicatée, à laquelle nous assimilons toutes nos roches éruptives. Ils constituent donc, eux aussi, des gîtes d'inclusions, mais à l'état de silicates.

² Page 64.

³ Le cinabre est constamment accompagné d'hydrocarbures. Mais il arrive également que ceux-ci aient une origine simplement superficielle et soient les agents précipitants du mercure au lieu d'être ses compagnons.

⁴ Voir, entre autres, 1899. II. HOEFER. *Zur Bestimm. des Alters der Gänge* (Oest. Z. f. B. u. H., t. 47).

consécutif, ou lui ayant fourni des galets. Or ce sont là des conditions très exceptionnellement réalisées. Les gisements que nous observons sont, sauf dans des cas tout à fait particuliers, ceux qui affleurent au jour, ou dans la profondeur desquels on pénètre en partant d'un premier affleurement au jour : gisements, pour lesquels manque la limite d'âge supérieure, la limite d'âge inférieure fournie par le dernier terrain traversé étant elle-même souvent très lointaine.

Quelles peuvent être les exceptions favorables à notre étude? C'est d'abord lorsqu'un filon, reconnu aux affleurements, se poursuit en direction au-dessous d'un autre terrain qu'il ne traverse pas, ou lorsqu'un escarpement naturel, comme une vallée offrant une coupe profonde, nous montre les filons s'arrêtant à un certain niveau sous un terrain déterminé.

On peut ajouter des cas, comme celui de la Belgique, où dans un vaste pays à terrains primaires généralement recouverts par une transgression crétacée, on trouve les gîtes métallifères exclusivement dans le terrain primaire et jamais dans le crétacé. Ailleurs, on peut également raisonner par continuité, par ressemblance, en admettant une homogénéité hypothétique dans un faisceau de filons, dont quelques-uns appartiennent à une période reconnue. Enfin, nous pouvons nous fonder sur cette observation démontrée par l'étude des sources thermales, que les fractures filoniennes restent peu longtemps ouvertes, en sorte que leur remplissage est presque contemporain de leur fracture et que le problème se ramène à déterminer l'âge de celle-ci. Malgré les difficultés que nous venons de signaler, le nombre des filons dont l'âge est au moins approximativement connu par une voie ou par une autre devient chaque jour de plus en plus grand et l'on peut commencer à raisonner avec quelque certitude sur ce sujet.

Le premier fait qui frappe aussitôt, lorsqu'on répartit les filons d'après leur âge est que *la très grande majorité d'entre eux sont tertiaires*, en Europe, comme en Afrique, en Amérique, ou en Asie. Plus on remonte dans le temps, plus les filons proprement dits semblent rares. En dehors de toute considération tectonique, nous venons déjà d'en donner une raison quand nous avons fait observer notre ignorance habituelle des filons n'affleurant pas au jour. Il en résulte aussitôt que, sauf pour les filons tertiaires qui ont eu plus de chances pour être décapés puisqu'il s'est amoncelé par-dessus eux moins de terrains postérieurs et moins de chances pour être complètement détruits puisque leur érosion a été moins longue, nous devons connaître seulement une infime minorité des filons existants et ayant existé : ceux qui se sont trouvés conservés et mis à nu par des circonstances spéciales. Ailleurs, sous des recouvrements qui nous empêchent de songer à aller les chercher, il doit exister des filons plus anciens presque aussi nombreux. Par exemple, sous le bassin de Paris, les terrains primaires peuvent être riches en filons insoupçonnés d'âge hercynien. Sous les transgressions précambriennes ou siluriennes des plates-formes primitives, il doit y avoir également des filons que nous ne connaissons probablement jamais. Les filons primaires visibles dans un pays comme la Belgique, généralement recouvert par une transgression crétacée, ne sont évidemment qu'une infime minorité ; et, dans un cas pareil, il peut arriver qu'on aille un jour en chercher

quelques-uns par des tunnels. Si l'on atteignait de semblables filons cachés depuis le crétacé, on se trouverait généralement éliminer les causes d'altération tertiaire qui ont agi, dans la même région, sur les autres affleurements filoniens et, là où on constaterait des altérations, on serait sûr qu'elles appartiendraient à la période précretacée, dont les caractères continentaux seraient ainsi mis en évidence.

Il est possible également que, dans certaines fosses marines d'effondrement, comme l'Océan Atlantique ou la Mer Egée, ou certaines parties du Pacifique, de la Mer des Indes, etc., il existe des filons anciens protégés par l'invasion de la mer.

Classement des gisements par leur âge. — Même si l'on s'en tient, comme nous y sommes nécessairement forcés, aux gîtes affleurants ou explorés par les travaux de mines, on peut, néanmoins, reconnaître l'existence de gisements métallifères appartenant, en proportion inégale, aux périodes géologiques les plus diverses et répartis sur toute la série des étages.

Dans les études de métallogénie un peu anciennes, on a méconnu cette complexité, comme on l'a fait également en pétrographie. On a commencé par confondre toutes les roches et tous les minerais dans une même formation : les uns considérant celle-ci comme extrêmement ancienne et profonde, les autres la supposant formée à partir de la surface à une époque quelconque. Puis, lorsqu'on a découvert que leur âge pouvait varier, on a attribué à chaque métal ou à chaque type métallogénique, comme à chaque structure de roches, un âge strictement déterminé, en s'ingéniant à établir des lois théoriques qui permettraient de reconnaître cet âge et d'autres règles, fondées sur la direction des accidents filoniens, qui autoriseraient à prévoir la minéralisation d'un filon par une simple observation de son affleurement à la boussole, rapportée à un système géométrique bien défini. Un peu plus tard, on a constaté une, puis deux récurrences de métaux semblables et l'on est enfin arrivé à la théorie actuelle, d'après laquelle chaque période de plissements ou d'effondrements a constitué une *phase de super-intensité éruptive et métallogénique*, dans laquelle se sont trouvés reproduits (avec une évolution possible, mais peu marquée) des types analogues : les différences apparentes résultant surtout des conditions diverses, où les minerais et les roches nous apparaissent, par suite d'une érosion plus ou moins avancée ¹.

¹ Il ne s'agit ici que de l'âge géologique. Parmi les divers procédés, ingénieux mais contestables, qui ont été imaginés pour évaluer l'âge d'un minéral dans une roche ou dans un filon, rappelons l'idée de Strutt, qui a proposé de rechercher, dans certains minerais, le rapport du poids d'hélium occlus au poids de substance radio-active ayant pu produire cet hélium. Si tout l'hélium provenait nécessairement de cette substance suivant la formule des transmutations actuelles et si tout l'hélium produit était resté dans le minéral sans se dissiper ou se transformer, le rapport en question pourrait être considéré comme représentatif du temps écoulé depuis la cristallisation du minéral. En fait, des analyses, portant sur des zircons d'âges géologiques variés, ont donné des chiffres croissant dans l'ordre que l'on devait d'autre part présumer : 319 millions d'années pour les roches diamantifères triasiques du Cap, 209 millions pour des roches permo-triasiques de l'Oural, 6 millions pour un zircon tertiaire d'Espailly, 900.000 pour une roche volcanique de l'Eiffel et seulement 110.000 pour une lave du Vésuve (*La Nature*, 28 mai 1910. Supplément). Une autre méthode, tendant au même résultat, est

Nous croyons donc aujourd'hui qu'il n'y a pas un âge déterminé pour l'étain, l'or, le plomb ou le mercure, pas plus qu'il n'y a un âge pour le granite, le microgranite ou le basalte. Mais cela n'empêche pas qu'en pratique les chances soient faibles de trouver un granite pliocène ou un basalte cambrien et, dans le même ordre d'idées, on rencontre peu d'étain tertiaire et peu de mercure primaire : pour la même raison, parce que l'étain est resté en relation intime avec les magmas acides de la profondeur et n'a donc pu être mis à jour que par une érosion avancée, tandis que le mercure, très soluble, arrive aujourd'hui même jusqu'à la surface, dans nos sources thermales sous pression des régions volcaniques. C'est dans cet ordre d'idées que nous allons pouvoir donner quelques notions générales sur l'âge des divers minerais et rappeler leurs relations, déjà signalées, avec la tectonique générale.

On a déjà vu¹, et je rappellerai bientôt comment, en s'éloignant de la roche intrusive en fusion, on pouvait trouver l'ordre de succession suivant : étain, cuivre, plomb, mercure. Ainsi que cela se passe pour les roches, dont les types épanchés sont (ou paraissent) plus jeunes que les types profonds, cet ordre de succession se retrouve (ou semble se retrouver), lorsqu'on envisage les émanations métallifères d'une phase de dislocation déterminée. Les incrustations métallifères ont pu, dans l'ordre où je viens de les énumérer, se prolonger plus ou moins longtemps, se produire plus ou moins tard pendant le dépôt des terrains successifs, ou, ce qui réalise une apparence semblable, les métaux ont pu, se dégageant simultanément, monter plus ou moins haut, atteindre des terrains déjà formés et superposés de plus en plus élevés dans la série.

Je ne crois pas qu'il faille attribuer à cette loi une rigueur absolue et, en tout cas, les déterminations d'âge sont souvent si insuffisantes pour les filons métallifères que la vérification en serait difficile ; il suffira donc de dire que, dans les districts où la série est un peu complète comme le Cornwall, la Saxe, la Toscane, etc., on semble apercevoir, en s'éloignant des granites et remontant la série des terrains sédimentaires, quelque chose d'analogue.

En tout cas, chacune des grandes périodes de plissement qui se sont succédé à la surface du globe, a ramené, comme je le disais plus haut, des venues métallifères comparables, et l'on trouve, par exemple, de grandes venues cuprifères précambriennes au Lac Supérieur, puis hercyniennes dans toute l'Europe centrale, enfin tertiaires dans l'Ouest et le Sud américain. Ces venues d'âges divers sont en relation avec des types analogues de roches éruptives. Leur développement dans un pays ou dans un autre dépend, comme je vais bientôt l'expliquer, des conditions

celle de J. Joly qui a mesuré les halos développés dans les micas des roches autour de leurs inclusions de zircons. Il admet que ces halos sont dus à l'émission de l'hélium par les zircons et fonction du temps pendant lequel cette émission s'est produite. Enfin, une hypothèse encore beaucoup plus aventureuse est celle de A. Holmes, qui mesure, dans une série de roches ou de terrains, le rapport de la teneur en plomb à la teneur en uranium, admettant avec Boltwood (ce qui est tout à fait contestable) que ce plomb vient de l'uranium et seulement de lui. Il trouve ainsi 340 millions d'années pour le carbonifère (*La Nature*, 8 déc. 1911).

¹ Pages 53 et 165.

de profondeur originelle et du type tectonique qui ont marqué leur province métallogénique.

Périodes de super-intensité métallogénique. — On sait que les études orogéniques conduisent à supposer, dans les mouvements de l'écorce terrestre, une continuité, interrompue par des phases de paroxysme. Cette écorce se déplace sans cesse lentement. De temps à autre, les efforts localement accumulés amènent un mouvement plus violent, qui peut affecter un caractère de généralité plus ou moins grand. De là résultent les plissements montagneux, les effondrements, etc. Le lien que nous admettons entre ces dislocations de l'écorce, les mouvements des roches ignées internes qu'ils provoquent et les dégagements métallifères qui en émanent, fait prévoir une distribution analogue des formations métallifères dans le temps : pendant les périodes calmes, continuation très restreinte et très locale du phénomène ; puis, à certains moments, développement exceptionnel des métallisations dans quelques vastes massifs disloqués en tous sens et injectés de tous côtés par les roches ignées. Les phases de grands mouvements, qui ont déterminé, soit des interruptions dans la sédimentation par émergence d'une chaîne plissée, soit, au contraire, de vastes transgressions marines, servent de points de repère en stratigraphie. Les premières surtout ont été productives d'éruptivité et de métallogénie le long de la zone à laquelle elles s'appliquaient. Nous trouverons donc des périodes principales de métallisation abondante dans la phase huronienne des plates-formes remontant à cette époque, dans la phase calédonienne ou hercynienne des plateaux consolidés après l'une ou l'autre de ces phases ; enfin dans la phase tertiaire, au voisinage des chaînes tertiaires et surtout où s'est fait sentir, sous la forme de dislocations, le contre-coup des mouvements d'âge alpin.

Gisements précambriens. — Par exemple, et pour nous borner aux gisements dont l'âge est assez bien déterminé, il existe, dans diverses parties des Etats-Unis, du Canada, de la Scandinavie, de l'Asie russe, du Brésil, etc., des gisements que l'on peut supposer précambriens. J'ai déjà cité le cas du Lac Supérieur, où les minerais de cuivre sont en relation nette avec une série keweenawienne de grès rouges, conglomérats, microgranulites, diabases, etc., analogue à celles que nous sommes habitués à rencontrer en Europe dans la phase permotriassique, mais ici conservée, malgré son âge ancien, par l'enfoncement de tout un grand massif synclinal, qui comprend le Lac Supérieur, au milieu de terrains plus anciens. Certains filons des Appalaches Sud et du Nouveau Mexique ont été considérés de même par les géologues américains comme s'étant formés à l'époque précambrienne et en profondeur. C'est le facies dit des « older veins », que l'on a opposé aux « younger veins », cristallisées pendant le tertiaire à quelques centaines de mètres sous les coulées de laves.

Gisements hercyniens. — Dans une phase postérieure, d'assez nombreux gisements semblent d'un âge hercynien bien déterminé. Nous signalerons, par exemple, ceux de la chaîne pennine anglaise qui s'encaissent très généralement dans le dinantien et n'affectent pas le carbo-

nifère supérieur, cependant abondamment représenté dans les mêmes districts. Parfois, on a constaté que des fossiles houillers, ou plus récents jusqu'au lias, avaient pénétré après coup par en haut dans des filons de ce district, à la suite d'une remise en mouvement. De même, les filons zincifères de la Belgique, encaissés dans les divers terrains primaires et recouverts par la transgression cénomaniennne, sont certainement antérieurs à celle-ci et, par suite, datent probablement de la phase de métallisation antérieure, qui est la phase hercynienne.

A Linares, en Espagne, on arrive à une conclusion semblable, les filons ayant été recouverts par des grès permo-triasiques.

A Freiberg, les filons dits de l'Edelquartz sont recoupés par les microgranites permien, que traversent, au contraire, les filons de la formation dite plombo-zincifère quartzeuse.

En Australie, où la venue correspondante est un peu plus ancienne, nous trouverons des filons aurifères datés presque rigoureusement de la fin du dévonien, car ils traversent le silurien et le dévonien inférieur et ont fourni des matériaux détritiques à partir du dévonien supérieur.

On constate encore une localisation remarquable de la plupart des filons d'étain, à travers toute l'Europe et l'Asie, le long de la chaîne hercynienne. C'est le cas dans l'Ouest et le N.-W. de l'Espagne, dans le Plateau Central français, en Bretagne, en Cornwall, en Saxe ; puis, dans toute la traînée si remarquable de la presqu'île de Malacca, de Bangka, Billiton, etc. ; ou encore en Annam et dans l'Est de l'Australie. L'âge des gisements stannifères paraît être le même dans le Swaziland. Tout au moins, pour ces gisements, l'âge carbonifère est-il le plus récent qu'on puisse supposer : certains d'entre eux étant sans doute à remonter dans le dévonien ou même le silurien.

On peut enfin rattacher, sous une forme ou sous une autre, à la même période hercynienne, la minéralisation cuprifère typique qui se trouve sur toute la longueur de l'Europe à l'état de sédiments permo-triasiques depuis l'Espagne jusqu'au Mansfeld et à l'Oural.

Gisements tertiaires. — Enfin, j'ai dit plus haut que l'âge tertiaire était extrêmement vraisemblable, ou même certain pour la grande majorité des gisements métallifères. Beaucoup d'entre eux sont en relation nette avec des roches de cet âge ; d'autres sont en filons recoupant le secondaire. Enfin, pour beaucoup de filons encaissés dans les massifs primaires et dont l'âge n'est pas nettement déterminable, dans le Plateau Central, la Bohême, le Harz, à Joachimsthal, Annaberg¹, etc., on arrive encore, par des considérations diverses, à admettre un âge tertiaire. Nous le montrerons pour les filons de plomb du Plateau Central, pour les grands districts métallifères de Harz, pour beaucoup de filons saxons, etc.

Cette série tertiaire peut comprendre tous les métaux, depuis ceux dont la cristallisation est profonde et reliée aux roches à structure granitique comme l'étain, jusqu'à ceux qui nous apparaissent les plus superficiels, comme le mercure. Cependant, ainsi que nous l'avons déjà fait prévoir,

¹ Les filons de Joachimsthal sont recoupés par les porphyres de l'oligocène inférieur et traversent les microgranites permien. On rattache leurs fractures aux mouvements tertiaires de l'Erzgebirge. De même pour les filons d'Annaberg, traversés par les basaltes.

l'étain et son groupe deviennent moins abondants dans la série tertiaire, tout en y étant représentés en Bolivie, ou dans des cas accessoires tels que la Toscane.

Par contre, le mercure apparaît fréquemment. Il suffit de citer tous les gisements de Californie, du Mexique ou des Andes, puis, en Europe, les très nombreux points où ce métal a été signalé, dans les Apennins, les Alpes Illyriennes, la Sierra Nevada et, de l'autre côté de la Méditerranée, en Algérie, en Tunisie. Le gisement d'Ildria, en Carniole, est très probablement d'âge tertiaire, comme les dislocations qu'il accompagne. Celui d'Almaden, dans la Meseta espagnole, pourrait être plus ancien, c'est-à-dire hercynien ; mais son âge n'est pas déterminé.

On trouve, au contraire, une richesse toute spéciale en métaux sulfurés BGPC, puis en argent et en or.

Cette phase de métallisation tertiaire nous apparaît comme terminée et il ne se forme aujourd'hui aucun gisement métallifère important à la surface du sol¹. Mais, comme nous avons essayé de le montrer précédemment², c'est peut-être en partie parce que les gisements susceptibles de se former aujourd'hui cristallisent à une profondeur trop forte pour que nous en ayons connaissance.

C. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES GISEMENTS.— AURÉOLES PÉRIPHÉRIQUES AUTOUR DES CENTRES IGNÉS.— PROVINCES MÉTALLOGENIQUES ET TYPES RÉGIONAUX DE GITES MÉTALLIFÈRES.— APPLICATIONS A L'EUROPE, A L'ASIE ET A L'AFRIQUE.

Nous avons étudié, jusqu'ici, les conditions dans lesquelles nous paraissent s'être constitués les gisements métallifères. Si notre théorie est exacte, elle doit permettre d'expliquer, non seulement comment un gisement s'est formé, mais aussi dans une certaine mesure pourquoi il s'est formé et de répondre ainsi à une question tout naturellement posée : pourquoi tel pays est-il riche en métaux plutôt que tel autre, et pourquoi spécialement en tel ou tel métal ? Inversement, le même ordre de considérations peut nous permettre de prévoir, — si nous connaissons, dans son ensemble, la constitution géologique d'un pays, — quelle catégorie de gisements métallifères on a le plus de chances d'y rencontrer et l'on doit, par conséquent, y chercher.

A cet égard, on n'a eu longtemps que des idées tout à fait vagues. On se contentait de remarquer que les filons métallifères étaient de préférence dans les pays montagneux ; ce qui est très loin d'être toujours exact ; car il aurait fallu au moins ajouter les pénéplaines autrefois plissées et disloquées et ayant subi un retour en profondeur.

Plus tard, on a cru avoir trouvé une loi géométrique qui rattachait universellement les cassures d'une région quelconque à la position de

¹ Il est à noter que si, comme on l'a souvent admis, ce sont toujours les mêmes roches, sans aucun apport plus profond, qui ont produit les phénomènes volcaniques depuis l'origine, comme, entre deux fusions, elles ont été soumises à une altération qui en a dissous les substances solubles, pour les entraîner à la mer, la proportion de celles-ci qui constituent les fumerolles, a dû diminuer progressivement.

² Pages 62 et 167.

celle-ci sur un certain réseau enveloppant toute la Terre, en sorte que l'on aurait pu prévoir, avant de pénétrer dans cette région, les directions qu'y prendraient les cassures et la nature du remplissage pour chaque direction déterminée. On sait comment cette idée a totalement disparu de la science et ce n'est aucunement dans cette voie que nous nous proposons de chercher.

L'idée que nous avons essayé d'introduire et de préciser et que nous croyons féconde est celle des *provinces métallogéniques* ayant chacune un certain *type régional*, qui dépend de la tectonique et peut, dans une certaine mesure, être prévu par elle. Selon nous, il faut commencer par dresser un inventaire méthodique des gisements minéraux en les classant, non plus seulement par type mécanique ou minéralogique, ni encore par métal, mais géographiquement, ou plutôt tectoniquement, par région, comparer chaque fois le type métallogénique avec le type tectonique et établir ainsi des lois, qui seront d'autant plus exactes qu'elles s'appuieront sur un nombre d'exemples concordants, de plus en plus considérable. Nous différons ainsi de ceux qui admettent l'existence d'un gisement métallifère en une région comme un fait d'observation accidentel, dont il est inutile de chercher la cause et dont il faut se contenter d'enregistrer les effets ; nous différons également de ceux qui, d'après des considérations industrielles, séparent les uns des autres les gisements d'une même région d'après leur métal dominant et attribuent ainsi à chacun d'eux une individualité non justifiée. A notre avis, un gisement de plomb est solidaire d'un gisement de zinc, de cuivre, de mercure, d'argent, etc., que l'on trouve dans le même district : d'abord quand il se trouve sur le même filon, mais même encore souvent quand leurs gisements semblent distincts. Nous tenons d'autant plus à insister sur cette idée que, d'après l'ordre descriptif adopté dans cet ouvrage, nous serons ensuite conduits à la laisser en apparence de côté pour examiner chaque métal séparément. L'idée contraire, qui a souvent dominé administrativement dans l'attribution des concessions, nous paraît procéder d'une erreur scientifique pouvant avoir les conséquences pratiques les plus fâcheuses. Nous considérons, par exemple, comme déplorable, de donner des concessions superposées de divers métaux que l'on suppose d'abord être distincts et qui, en réalité, sont connexes. L'idée de venues successives tout à fait indépendantes l'une de l'autre et pouvant remonter à des périodes géologiques séparées par de longs intervalles, idée qui a été classique en métallogénie, a contribué à des décisions de ce genre, dont il est résulté ensuite des complications juridiques presque inextricables.

Suivant nous, — et nous l'avons fait remarquer dès le début¹, — la métallisation d'une région dépend : 1° de la composition du magma fondamental qui s'est trouvé en former le substratum ; 2° des mouvements tectoniques subis par cette région, mouvements ayant eu pour conséquences principales : l'introduction de magmas différenciés d'une composition et d'une structure déterminées, puis l'ouverture de dislocations d'un certain type, enfin un retour en profondeur ou une remontée au jour plus ou

¹ Page 45.

moins accentués; 3° enfin du temps depuis lequel ces mouvements se sont opérés, temps qui détermine en moyenne l'intensité des érosions et, par suite, la profondeur de la coupe horizontale, arbitrairement placée dans la chaîne primitive, qui forme la superficie actuelle.

Étant donné la solidarité admise entre les roches ignées et les gites métallifères, nous aurons donc à examiner d'abord quels types de roches ignées apparaissent au jour ou peuvent être supposés exister à faible profondeur dans la région qui nous intéresse; puis la distance à laquelle les gisements se trouvent placés de ces roches ignées; ensuite, l'allure des plissements ou des dislocations que le massif encaissant a subis; enfin, la profondeur moyenne d'érosion qui paraît avoir été atteinte. De là résulteront des présomptions pour y trouver un type métallogénique déterminé: présomptions qui s'accroîtront si, comme cela arrive en effet, on constate que, partout où le type tectonique est le même et entraîne un même type pétrographique, le type métallogénique est également analogue.

Un certain nombre d'observations générales résultent des faits très nombreux que nous aurons l'occasion de décrire plus tard. Nous allons commencer par les énoncer rapidement.

1° RELATION DU TYPE MÉTALLIFÈRE AVEC LE TYPE PÉTROGRAPHIQUE CONNEXE ET AVEC LA DISTANCE DU GISEMENT À LA ROCHE IGNÉE

Laissant de côté la composition primitive du magma fondamental, sur laquelle nous sommes mal renseignés, mais qui se trouve cependant mise en évidence par notre méthode des provinces métallogéniques, nous constatons très nettement qu'un type pétrographique entraîne un type métallogénique, quelle que soit d'ailleurs la cause pour laquelle ce type pétrographique se trouve lui-même développé. Ainsi, pour ne considérer d'abord que la structure, au voisinage des magmas granitiques ou granulitiques, nous trouverons l'étain et son groupe, parfois l'or, plus rarement le cuivre. Des roches granulitiques passant à des microgranites accompagneront fréquemment de la stibine. Près des roches ophitiques ou franchement microgrenues, nous verrons s'accroître la proportion du cuivre, puis du plomb et du zinc, qui persisteront dans les remplissages reliés à des roches microlithiques. Enfin, le groupe franchement microlithique ou pétrosiliceux sera surtout accompagné d'argent ou de mercure.

Cette relation correspond surtout, selon nous, à la distance plus ou moins grande jusqu'à laquelle les sels du métal en question ont pu s'écarter de la roche mère, tout en restant en dissolution, tandis que les structures considérées se produisaient elles-mêmes à une distance croissante. Cette distance a pu être réalisée pratiquement de deux manières: en coupe verticale ou en coupe horizontale¹.

En coupe verticale, l'ordre où nous venons d'énumérer les structures rocheuses et les métaux connexes a pu être réalisé par une profondeur plus ou moins grande de cristallisation: profondeur elle-même mise à nu

¹ Voir, pages 53 et 54, les schémas des figures 2 et 3.

par une érosion plus ou moins forte. Si cette érosion a porté très profondément, ce qui a lieu de préférence dans des chaînes anciennes, on y trouvera surtout des roches de profondeur à structure granitique et, au voisinage, les métaux tels que l'étain, le tungstène, l'or, etc., énumérés plus haut comme connexes. Si l'érosion a été moins profonde, les filons d'intrusion microgrenus vont dominer et nous aurons du cuivre, du plomb, du zinc, ce que nous avons appelé les BGPC. Enfin, si l'érosion a à peine commencé, si ce que nous voyons au jour était également très près de la surface au moment où roches et minerais associés ont cristallisé, nous aurons, avec le plomb, le zinc, etc., une abondance de minerais argentifères, parfois en même temps aurifères et du mercure. Nous verrons tout à l'heure comment cette profondeur plus ou moins grande correspond à un âge plus ou moins ancien de la consolidation pour tout le massif envisagé et s'associe d'ordinaire avec un certain type de gisements, et une certaine allure des vides remplis, en sorte qu'il y a concordance entre la forme de ce vide et la nature de son remplissage.

En coupe horizontale, la loi se traduit de même par une disposition des métaux suivant des auréoles concentriques autour du magma igné qui leur a servi de point de départ, chacun d'eux ayant pu s'écarter d'autant plus qu'il donnait des sels plus aisément solubles. Dans cet ordre d'idées, on doit prévoir toutes les complications et les anomalies que peuvent entraîner la structure très hétérogène du sol, les facilités de pénétration très différentes rencontrées par roches, fumerolles, ou eaux métallisantes dans un sens ou dans l'autre, la profondeur également différente qu'ont pu atteindre les érosions sur des compartiments voisins ayant rejoué différemment après avoir été inégalement plissés, etc. On trouve pourtant quelques districts métallifères, où cette règle semble assez bien établie dans l'ensemble et où on observe bien la succession théorique : étain, cuivre, zinc, plomb, argent, mercure. Nous en citerons tout à l'heure des exemples en Cornwall, en Toscane, au Yunnan, en Algérie.

2° RELATION DU TYPE DE GISEMENTS AVEC LA PROFONDEUR ORIGINELLE

Nous avons déjà dit comment, pour nous, la zone de cristallisation filonienne avait dû être limitée verticalement dans les deux sens, en bas comme en haut, en sorte qu'il ne saurait s'agir de filons indéfinis¹. Le type filonien n'a pu être réalisé que dans une zone, où les dislocations étaient susceptibles d'affecter cette forme de cassures, où ces fractures ne tendaient pas à se refermer par la pression aussitôt après avoir été ouvertes et où existaient des circulations hydrothermales susceptibles de les incruster. Il en est de même des autres types divers de gisements, qui n'ont également dû affecter qu'une zone restreinte dans la profondeur des massifs plissés et disloqués. En sorte que, schématiquement, nous serons amenés à envisager la coupe suivante, dont les tronçons nous seront offerts disséminés à la surface suivant les conditions de plissement, puis d'érosion.

¹ Page 166.

a) En profondeur¹, nous admettons qu'il a dû y avoir pénétration intime des magmas ignés dans les terrains encaissants. D'où le type pétrographique que nous considérons comme représentatif des retours en profondeur accompagnés d'un métamorphisme régional : une gneissification accompagnée de pénétrations pyriteuses disséminées, auxquelles nous avons donné le nom d'*imprégnations diffuses* et dans lesquelles on pourra trouver du cuivre ou de l'or, mais peu de plomb ou de zinc. Dans la même zone approximative, nous aurons également des laccolithes basiques à structure granitique, à l'intérieur desquels se seront opérées des *ségrégations oxydées* et à la périphérie desquels les émanations sulfurées auront donné des *gîtes de départ immédiat*, où domine le sulfure de fer, parfois cuprifère ou nickélifère. Ainsi, imprégnations diffuses de profondeur à pyrite aurifère, ségrégations oxydées de titano-magnétite ou de fer chromé, gîtes de départ sulfurés cuprifères et nickélifères, voilà les types de gisements principaux que nous devons nous attendre à trouver dans les régions où l'érosion, portant sur des massifs très anciennement consolidés, a atteint une grande profondeur, comme le Canada, la Scandinavie ou la Finlande, l'Asie russe, le Brésil, etc. On ne peut pas dire que les filons y manqueront totalement, mais ils y seront très rares et l'on pourra se demander s'ils ne résultent pas d'une dislocation ultérieure, comme celle dont les massifs hercyniens d'Europe ont subi si visiblement l'effet au moment des mouvements alpins. Ces filons des plates-formes anciennes, ce seront, par exemple, ceux du district de Cobalt dans l'Ontario, ou ceux de Kongsberg en Norvège, tous deux argentifères, ou encore, si on veut y voir un type filonien, les gisements cuprifères du Lac Supérieur.

b) Avec une profondeur d'érosion moindre portant sur une zone de consolidation moins ancienne, telle que celle habituellement réalisée sur la chaîne hercynienne, on verra apparaître au jour en grande quantité les roches acides formant une scorie plus légère et plus haute que les roches basiques et, autour d'elles, les minerais des métaux qu'elles entraînent habituellement, tels que l'étain et son groupe, puis le cuivre et parfois l'or. De telles roches auront pu, bien entendu, subsister accidentellement dans les plates-formes plus anciennes, de même qu'elles pourront apparaître dans les massifs plus récents ; mais on doit les considérer comme représentatives de la chaîne hercynienne et c'est par là que les métaux du groupe de l'étain sont devenus à leur tour représentatifs de cette chaîne. Ici nous avons, comme formes de gisements, des *départs acides immédiats*, qui pourront se traduire par des stockwerks stannifères avec association du tungstène, du bismuth et de l'or, ou, dans d'autres cas, par des masses d'oxyde de fer associées à des roches acides ou neutres, ou encore par des filons de stibine, de mispickel, etc. : tous gisements n'offrant pas en général une grande continuité, n'ayant pas encore l'allure des larges fractures que nous verrons un peu plus tard et un peu plus haut. Cependant des cas de *fractures* filoniennes commencent à se développer même dans les massifs hercyniens non redислоqués à l'époque tertiaire et il y correspond une accentuation de la teneur en zinc et en plomb.

¹ Voir la figure 2 page 53.

c, d, e, f) C'est à une zone plus récente, moins profonde et portant l'empreinte d'accidents mécaniques différents que se rapportent les *filons tertiaires*. Ceux-ci, nous l'avons dit¹, constituent la très grande majorité des filons sur lesquels portent nos travaux, et nous avons déjà dit que nous voyions, dans cette observation, plutôt un effet des conditions de profondeur et d'érosion examinées en ce moment qu'un résultat de l'évolution.

A cette époque, comme dans les précédentes, il y a eu de grands plissements; mais ce n'est pas, nous allons le voir, sur les parties subsistantes et non érodées de ces chaînes plissées (type *d*) que portent la plupart des gîtes métallifères tertiaires. On trouve ceux-ci de préférence: ou dans les avant-pays redислоqués (*c*), dans lesquels les terrains avaient pris, par retour en profondeur, une compacité qui leur permettait de donner des cassures prolongées sous un effort suffisant; ou encore dans les parties latérales de ces chaînes elles-mêmes, qui sont aussi celles où se montrent les roches éruptives de la même époque (*e, f*).

Nous rencontrons ainsi de superbes districts métallifères à nombreux filons entassés dans un champ parfois restreint, où s'est accumulé un extraordinaire effort mécanique, puis de grands filons pouvant être suivis sur des cent kilomètres de long, des fractures larges et continues, dans lesquelles le remplissage est essentiellement formé des BGPC, tandis que l'étain disparaît presque totalement et que les ségrégations basiques font également défaut. L'argent aurifère y abonde parfois; parfois aussi le mercure s'y développe.

Enfin, nous pouvons encore observer, par endroits, des manifestations plus superficielles qui se montrent généralement en relation tout à fait directe et immédiate avec des roches volcaniques, parfois sous la forme des *fissures de retrait*, ailleurs sous celle des *filons minces et inconstants*. Dans ces conditions ont pu se constituer des réseaux localement très riches en métaux précieux, mais sans continuité, où l'argent prend, au moins industriellement, le dessus sur les BGPC et où le mercure est également fréquent.

Là où les chaînes plissées subsistent, n'ayant subi encore qu'un commencement d'érosion insuffisant pour en dénuder les parties profondes, il y a fréquemment tendance à la dispersion des gisements dans des terrains encore meubles qui se sont mal prêtés à l'ouverture de fractures prolongées. Ces régions plissées tertiaires sont essentiellement celles des *filons-couches*, des *filons de contact*, des *veines dispersées*, dans lesquelles la métallisation de BGPC a surtout pris de la valeur quand son encaissement dans un terrain calcaire ou au contact d'un calcaire lui a permis, par altération ultérieure, de se concentrer dans un amas de calamine, d'oxyde de fer, etc.

Ces idées vont se trouver éclaircies et précisées par quelques exemples choisis parmi ceux que nous avons eu l'occasion d'étudier le plus en détail. Nous allons les parcourir en envisageant successivement les divers continents².

¹ Pages 245 et 247. Voir p. 254, l'application de ces subdivisions *c, d, e, f*.

² Voir, à ce sujet, une série d'articles dans la *Revue générale des Sciences*: sur les variations des filons en profondeur (30 avril 1900), sur l'Afrique (30 nov. 1903), sur l'Italie (30 sept. 1905), sur l'Asie (15 déc. 1910).

3° PROVINCES MÉTALLOGÉNIQUES D'EUROPE

En Europe, nous admettons six groupes principaux de types régionaux, que nous retrouverons, ensuite, avec une importance relative différente, sur les autres continents. C'est d'abord en reprenant les subdivisions précédentes : (a) le type scandinave des faites primitifs avec leurs ségrégations, leurs imprégnations diffuses de profondeur, leurs filons-couches. C'est ensuite (b) le type franchement hercynien des massifs où nous savons que les filons sont antérieurs au secondaire, comme dans la chaîne Pennine, le Cornwall, l'Ardenne, la Belgique, certaines parties de la Bretagne, du Plateau Central, de la Saxe, de la Meseta, de l'Oural. Puis ce sont (c) les zones des mêmes massifs hercyniens redислоquées par les accidents tertiaires, comme cela paraît être le cas dans la plus grande partie du Plateau Central, du Harz, de la Saxe. Ce sont ensuite (d) les chaînes plissées tertiaires proprement dites avec leurs types alpestres ou pyrénéens. Puis viennent (e) les zones à intrusions éruptives ressemblant aux types de l'Ouest américain, comme en Hongrie ou en Toscane. Enfin l'on a (f) les types méditerranéens à interventions caractéristiques des terrains calcaires. Voici des exemples correspondants à chacun de ces types principaux. Les nombreux gisements, que nous nous contentons de nommer ici, seront ultérieurement décrits dans le reste de l'ouvrage.

a) **Scandinavie.** — La Scandinavie¹ est le pays d'Europe où il faut aller étudier les gisements de ségrégation oxydée ou de départ sulfuré péri-phérique. C'est là que nous prendrons plus tard comme exemples : les minerais de Rautavaara et de Taberg, où de la titano-magnétite s'est différenciée dans une hypérite à olivine ; le groupe des sulfures nickélicifères cristallisés à la périphérie des gabbros d'Erteli, de Meinkjär, etc. Nous y trouverons aussi très abondamment des imprégnations de pyrite diffuses ou concentrées en amas interstratifiés dans des terrains influencés par un métamorphisme de profondeur à Röraas, Falun, Földal, Vigsnaes, etc. Les types filoniens sont rares et presque localisés dans le Sud, où l'influence des mouvements calédoniens est incontestable : fahlbandes de Kongsberg, traversées par des filons minces enrichis en argent à leur intersection, épigénies plombo-zincifères dans les calcaires de Sala².

b) **Chaîne Pennine, etc.** — Nous trouvons déjà des groupes métallogéniques tout à fait différents quand nous abordons les zones hercyniennes excentriques, où l'influence des mouvements alpins s'est peu ou pas fait sentir. Ainsi, dans le Cumberland, le Derbyshire, etc., dans la chaîne Pennine et le Pays de Galles, nous observons des types filoniens contenant parfois de l'or ; ailleurs des filons de BGP ayant pris une allure tout à fait spéciale par leur encaissement dans les calcaires : l'équivalent, avec une métasomatose plus ancienne, de ce qui existe, sur la zone méditerranéenne, pour les gîtes tertiaires. Le Cornwall nous offrira, autour de

¹ 1903. L. DE LAUNAY. *L'origine et les caractères des gisements de fer scandinaves* (1 vol. Dunod).

² Cependant on peut citer, au Nord de la Norvège, les filons de Soennigdalen.

massifs granitiques, des auréoles successives présentant, d'abord de l'étain et du tungstène, auxquels s'ajoute bientôt du cuivre, qui devient ensuite plus abondant, et fait place lui-même à la forme filonienne du plomb et du zinc.

c) **Plateau Central, etc.** — Sur le continent, nous attribuons encore à la période hercynienne (*b*) la zone stannifère et aurifère que nous suivrons plus tard en Espagne, en Portugal, dans le Plateau Central, en Bretagne, en Saxe, etc. Les filons plombo-zincifères, que l'on rencontre, en même temps, sur cette zone, appartiennent visiblement à deux groupes indépendants. Les uns ont été recouverts par les sédiments secondaires et sont, par suite, d'âge hercynien (*b*); d'autres résultent manifestement de redислоcaions tertiaires (*c*). Il n'est pas toujours facile de faire la distinction dans le détail, mais elle est évidente dans l'ensemble et l'on doit, par exemple, séparer des gisements réellement hercyniens la plupart des filons plombo-zincifères du Plateau Central.

Au contraire, nous avons déjà dit qu'il fallait rapporter à la fin de la phase hercynienne (*b*) le type spécial de métallisation qui affecte, à travers toute l'Europe, les terrains permotriassiques sur toute la longueur de la chaîne plissée dite hercynienne, avec minéralisation cuprifère, ou, accessoirement, plombifère.

d) **Pyrénées, Alpes, etc.** — Le type des chaînes plissées tertiaires se présente dans la Sierra Nevada, dans les Pyrénées (avec leurs prolongements), dans les Alpes, dans les Carpathes. On observe, par exemple, dans les Pyrénées, un système très général de filons-couches inconstants et disloqués renfermant les BGPC habituels. Ces filons ont pris surtout de la valeur là où ils contenaient une grande abondance de sulfure de fer, qui, dans les parties de la chaîne soumises à une forte altération superficielle, a donné des carbonates et des oxydes. Ailleurs, on a pu trouver des renflements locaux, où tantôt la blende, tantôt la galène, tantôt même la pyrite cuivreuse, pouvaient motiver une exploitation un peu prolongée. Le versant espagnol semble offrir des types de cassures plus continus.

Les Alpes présentent également beaucoup de filons dispersés ayant pris l'allure de filons-couches. Les indices de métallisation sont abondants, les gîtes fructueux assez rares. On connaît cependant quelques cas d'oxydes et carbonates de zinc ou de fer encaissés dans les calcaires. Il existe, en outre, sur certaines parties de la chaîne, des métallisations toutes différentes en rapport avec un métamorphisme régional par retour en profondeur et pouvant remonter à une phase plus ancienne (*a* ou *b*).

Quand les chaînes tertiaires ont été simplement plissées sans dislocaions ni manifestations éruptives, comme le Jura par exemple, les minerais y font totalement défaut.

e) **Hongrie.** — Le type Ouest-américain des métallisations liées à des manifestations éruptives tertiaires est surtout représenté en Europe à l'intérieur de la courbe carpathique, dans les deux ou trois grands districts métallifères de la Hongrie. On a à Schemnitz, Kremnitz, dans l'Erzgebirge hongrois, le groupe des filons complexes riches en argent et en or, associés à des roches d'épanchement. Vers l'Est, les districts de Nagy Banya et de

Zalatna offrent des filons d'or tertiaires souvent associés avec du tellure. Enfin la zone du Banat, qui se prolonge en Serbie, est caractéristique pour le groupe des intrusions métallifères sulfurées avec magnétite, associées à une gangue silicatée dans le contact des roches éruptives et de calcaires secondaires.

f) **Type méditerranéen.** — Le dernier type métallogénique d'Europe est celui que l'on peut qualifier de méditerranéen et que nous retrouverons plus tard dans le Nord de l'Afrique ou en Turquie d'Asie. Ce sont les filons de BGP passant à travers schistes et calcaires avec formation d'amas calaminaires, ou de carbonates et oxydes de fer, à la rencontre des calcaires. Nous allons en trouver des exemples en étudiant un peu plus en détail la région italienne pour y chercher cette relation de la métallogénie avec la tectonique et avec l'époque ou la profondeur de la cristallisation, que nous nous efforçons de mettre en évidence.

DESCRIPTION PLUS DÉTAILLÉE DES PROVINCES MÉTALLOGÉNIQUES DANS
LA RÉGION ITALIENNE

Ne pouvant ici suivre dans le détail l'application de ces idées à toutes les régions métallifères européennes, nous nous contenterons d'envisager un cas assez typique que nous avons eu l'occasion d'étudier personnellement en détail : celui de la région italienne, où l'on trouve des spécimens de presque tous les types signalés plus haut, avec prédominance manifeste de minéralisations tertiaires¹.

Quand on prend une carte géologique d'Italie et qu'après en avoir souligné, par un moyen graphique quelconque, les principaux caractères tectoniques, on essaie d'y placer les gites métallifères, distingués eux-mêmes par groupes théoriques, on voit aussitôt apparaître, indépendamment de toute hypothèse, une certaine loi de répartition, qui ne saurait être purement accidentelle (fig. 14).

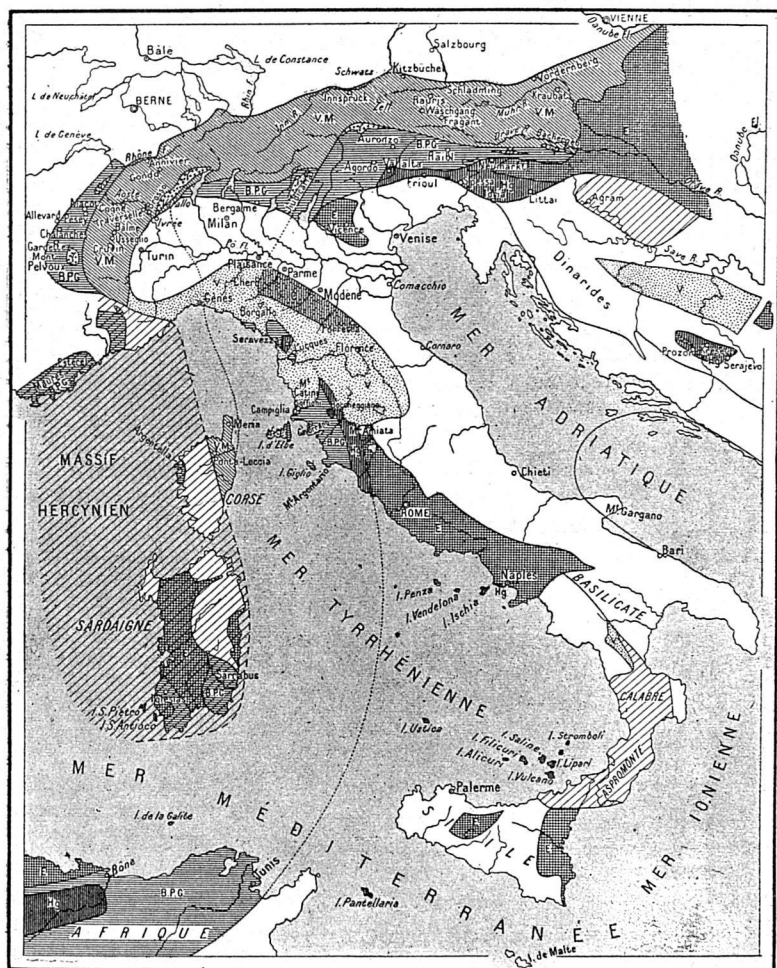
α) **Zone des roches éruptives à mercure, antimoine, etc.** — Notre carte métallogénique de l'Italie montre d'abord l'absence complète de minerais dans les zones éruptives (E) que l'on peut considérer comme des zones déprimées, où subsiste et se montre à la surface une portion particulièrement élevée de ce qui était l'écorce superficielle à la fin de l'époque pliocène ou au début du pléistocène.

On observe seulement la localisation du mercure sur le pourtour de ces zones éruptives récentes : localisation qui se manifeste un peu partout dans le monde avec une rigueur presque théorique, parce que la combinaison sulfurée du mercure et des alcalis est particulièrement soluble, soluble au point de persister même dans certaines de nos sources thermales actuelles.

Il suffit, en effet, d'un coup d'œil sur la carte ci-jointe pour voir combien les gisements de mercure (avec association fréquente d'antimoine) forment une auréole bien nette (Hg) aux zones éruptives récentes, dont elles

¹ Voir le développement de cette étude dans mon ouvrage sur la *Métallogénie de l'Italie et des régions avoisinantes* (1906).

ne s'écartent jamais beaucoup. La relation apparaît encore plus évidente si l'on remarque la rareté extrême du mercure dans les pays situés plus au Nord ou à l'Ouest, en Allemagne, en France, etc. On peut la vérifier depuis la



LÉGENDE

- | | |
|---|---|
| Roches éruptives récentes f | Zone du pétrole c |
| Zone du mercure Hg | Zone des roches vertes avec facies métamorphiques, imprégnations sulfureuses et gites de ségrégation YM |
| Zone des filons sulfurés plombo-zincifères B.P.C. | Granites, tonalites, etc. Y |
| Zone des roches vertes V | Massifs anciens (Calabre, etc.) Z |

Les parties non métallisées ont été laissées en blanc.

Fig. 14. — Carte métallogénique de la région italienne.

Serbie jusqu'à l'Algérie. C'est une trainée de gisements, parfois très importants, qui comprend : Prozor en Serbie ; Idria, Littai et Neumarkt en Carniole et Carinthie ; les minerais du Frioul et de Vallalta ; puis la trainée toscane de Serravezza, de Jano, du Monte Amiata et de Capalbio ; le mer-

cure actuellement en formation de la solfatare du Vésuve et tous les affleurements de la province de Constantine ou de la Tunisie. Les gisements mercuriels ne s'écartent jamais beaucoup, sur la carte, des massifs éruptifs, à l'intérieur desquels on notera, en outre, qu'ils ne pénètrent pas. La relation, comme toutes celles que nous allons essayer de mettre en évidence, semble correspondre à un départ périphérique, à un dégagement extérieur par fumerolles.

Remarquons, à propos de ces gisements mercuriels, que partout ils sont accompagnés de dépôts hydrocarburés ou de dégagements carburés actuels, sous la forme, tantôt de grisou, tantôt d'acide carbonique, aussi bien à Idria qu'à Jano ou au Monte Amiata.

Dans la même zone aussi se trouvent les sources chaudes à acide borique qui constituent les soffioni de la Toscane. Les borates sont un produit salin connu des bassins d'évaporation, et l'on a pu, dès lors, être tenté d'attribuer les soffioni toscans au simple lessivage par les eaux thermales de gisements salifères profonds. Mais il faut remarquer la position de ces soffioni à la périphérie immédiate des roches éruptives récentes, presque dans la même zone où se trouve le mercure. En dehors des soffioni, on trouve des traces d'acide borique dans une série de sources thermales situées sur la même trainée mercurielle, à Boccheggiano, etc., et ce rapprochement, qui pourrait apparaître purement accidentel, prend le caractère d'une observation théorique quand on constate qu'il se renouvelle pour les gisements de borax et de mercure en Californie. Nous sommes donc conduits à imaginer qu'il a dû se produire, autour des zones éruptives récentes encore peu érodées de l'Italie, c'est-à-dire à une faible profondeur dans les parties de l'écorce accidentées par le volcanisme, une série de fumerolles contenant du mercure, de l'antimoine, du soufre, du carbone et du bore : fumerolles susceptibles de monter jusqu'à la superficie et ayant donné, par suite, des catégories de dépôts que nous trouvons toujours de préférence dans les parties récemment disloquées et peu érodées de l'écorce terrestre. Ces produits, faciles à remettre en mouvement puisqu'ils donnent des sels solubles, peuvent, d'ailleurs, lorsque nous les voyons arriver actuellement au jour dans des sources thermales, sasses, etc., n'être là que par suite d'un emprunt à un premier dépôt antérieur ; leur concentration peut se trouver à une phase plus ou moins avancée des cycles qu'elle est susceptible de parcourir, et le champ reste ouvert, par exemple, à toutes les interprétations superficielles, par lesquelles on a tenté d'expliquer le dépôt des gites cinabrifères, tels que nous les rencontrons aujourd'hui dans nos exploitations.

β) — **Zone des massifs disloqués à accidents tertiaires.** — Après cette zone du mercure, de l'antimoine, du bore et peut-être des hydrocarbures, les caractères métallogéniques de l'Italie changent complètement. On rencontre, en effet, plus à l'Ouest ou plus au Nord, une portion de l'écorce, où apparaissent, à l'état de tronçons disloqués, de horsts ayant subi des déplacements relatifs dans le sens vertical, des lambeaux de terrains anciens, avec intercalation de noyaux ignés cristallins à type granitique, ayant pu être amenés par l'érosion jusqu'au jour.

Ce n'est pas là, à proprement parler, l'« Avant-pays » de la chaîne

plissée tertiaire; les plissements ont poussé jusqu'ici; notre zone métallifère à BGP, qui part de la Toscane et comprend la région de Lucques et de Seravezza, semble, plus au Nord, obliquer sur la chaîne des Apennins pour s'accoler intérieurement à la courbe présumée des plis alpins. Tout au moins, après avoir perdu cette catégorie de gisements vers Seravezza, faut-il aller du côté de Côme et de Bergame pour les retrouver, en même temps que les massifs de Permo-trias et de Carbonifère, dont les fractures se sont prêtées à ce genre de minéralisations. Puis, à l'Est de Côme, la zone en question se poursuit, le long des Dinarides, dans les Alpes du Bergamasque et de la Carinthie. Elle semblerait donc, sur la traversée de la Lombardie, indépendante des plis tertiaires. Néanmoins, on a l'impression très nette, en l'abordant, de pénétrer dans une zone plus profonde de l'écorce, d'aborder une partie latérale des géosynclinaux plissés qui ont formé les Apennins et les Alpes : zone où le soubassement ancien, soumis à la pression de ces plissements, a été disloqué par compartiments et où l'allure de ces accidents a pu être influencée par les directions antérieures de ce soubassement.

Au Sud, quelques rares minerais du même genre reparaissent à la pointe Sud de l'Italie, avec le massif ancien de l'Aspromonte et de Messine; mais la véritable continuation de notre zone métallifère est, de l'autre côté de la mer tyrrhénienne effondrée, en Tunisie et Algérie, où nous retrouverons, à partir d'une semblable trainée éruptive (qui ici est située au Nord), des minerais analogues, accompagnés, comme je l'ai dit déjà, d'antimoine et de mercure.

Dans la zone métallisée que nous envisageons en ce moment, le type est un type filonien, les minerais sont des dépôts d'incrustation thermique et, pour définir ces gisements, il y a lieu d'examiner d'abord les fractures remplies, puis leurs remplissages.

En ce qui concerne les fractures remplies, on peut remarquer, dans toute la Toscane, le rôle prépondérant des filons-failles, des filons de contact. Les incrustations ont, pour la plupart, minéralisé les plans de rupture à peu près Nord-Sud (légèrement N. W-S. E.), suivant lesquels s'est opéré le jeu relatif des vousoirs juxtaposés pendant leurs exhaussements et leurs effondrements. On peut donc attribuer un rôle prépondérant aux déplacements verticaux dans cette série de phénomènes connexes, qui comprend, avec l'enfoncement d'un ou plusieurs vousoirs, l'injection des éléments liquides (ou liquéfiés) dans les vousoirs voisins et le dégagement simultané de fumerolles métallisantes. Les contacts entre terrains d'inégale perméabilité, réalisés par de semblables failles, ont naturellement facilité la circulation des eaux souterraines suivant les plans de contact. Dans le district de Lucques et Seravezza, les conditions sont analogues.

Si l'on passe, au contraire, aux Alpes du Bergamasque et de Carinthie, on voit s'accroître, à côté du rôle des failles, celui des contacts normaux entre schistes et calcaires superposés, qui correspond à un phénomène identique, c'est-à-dire à un plan de pénétration facile pour les eaux souterraines entre un schiste imperméable et un calcaire perméable, mais parfois avec une sorte d'interstratification horizontale un peu déroutante au premier abord. C'est ainsi que, dans la région de Bergame

(Ponte di Nossa), les minerais sont surtout entre schistes et calcaires du Trias. Vers le val Trompia et le val Sabbia, à l'Ouest du lac de Garde, les minerais très nombreux incrustent, soit les failles entre le Permien et les schistes cristallins, soit les fractures parallèles à la Giudicaria. A Auronzo et Raibl, au Sud des Alpes Carniques, comme à Bleiberg et Greifenburg au Nord du Gailthal (d'un côté, dans les Dinarides, couchées vers le Sud; de l'autre, dans les Alpes à plis verticaux), on retrouve des imprégnations dans les calcaires du Trias, avec localisation au Bleiberg sous un toit de schistes.

Les champs métallifères de ce groupe ont chacun une physionomie spéciale, et cette physionomie paraît bien correspondre avec la position des minerais considérés par rapport aux roches éruptives de la période correspondante.

J'ai déjà signalé le plus caractéristique de ces faits en montrant le mercure localisé sur le pourtour des roches éruptives à épanchements superficiels. Il semble que, lorsqu'on approche, au contraire, des roches cristallines grenues à type granitique, très vraisemblablement formées en profondeur et sous pression, on voie se développer un autre groupe, principalement composé de pyrite de fer, avec chalcopyrite accessoire et quelquefois un peu d'étain ou de bismuth. Et, dans une zone intermédiaire, quand aucune roche éruptive n'apparaît au jour, ou du moins lorsqu'il n'apparaît que des roches à l'état de filons (microgranulites, porphyrites, etc.), les minerais dominants, dont la relation avec une roche ignée devient très problématique, sont surtout le plomb et le zinc.

Ces trois groupes principaux, dont nous avons déjà vu le rôle théorique, chevauchent, bien entendu, les uns sur les autres, comme on doit l'attendre pour un phénomène où n'ont pu manquer d'intervenir des circonstances aussi complexes; mais il est certain, par exemple, que tous les minerais des Alpes carinthiennes et de la région de Bergame, où les roches éruptives font à peu près défaut, sont des minerais de plomb et de zinc; de même à Lucques et Seravezza. Au contraire, à Massa Marittima, Campiglia Marittima ou à l'île d'Elbe, près des massifs granitiques, c'est évidemment, malgré la présence du plomb et du zinc, la pyrite de fer plus ou moins cuivreuse qui domine (Boccheggiano, la Fenice, Serrabottini, île d'Elbe, etc.), avec apparition de l'étain dans l'île d'Elbe et le Campigliese. Pour l'Algérie et la Tunisie, nous ferons bientôt une observation du même genre.

L'étain se montre ici à sa place prévue, avec les pyrites de fer cuivreuses (comme en Cornwall), non loin des culots granitiques, à dégagements de fumerolles acides prouvés par les cristallisations de tourmaline sur toute leur périphérie. Malgré ces pegmatites à tourmaline, qui entourent d'une auréole les granites du Campigliese ou de l'île d'Elbe en pénétrant dans les sédiments encaissants, on peut, d'une façon absolue, considérer ces massifs granitiques toscans comme pauvres en fumerolles acides par rapport à nos grands massifs hercyniens de granite à mica blanc, si développés dans le Plateau Central, en Bretagne, en Cornwall, ou en Saxe. C'est là surtout que l'étain arrive à jouer un rôle essentiel et nous ne saurions nous étonner qu'en Toscane, ce rôle soit, au contraire, très subordonné.

γ) — **Zone des roches vertes à ségrégations et imprégnations diffuses.**

— Nous arrivons maintenant à une zone tout à fait différente de la métallogénie italienne, celle où apparaissent les roches basiques, les « roches vertes » (V), et où, du même coup, se montrent toute une série de gîtes que nous pouvons supposer directement reliés à ces roches basiques : gîtes de ségrégation ignée ou de départ sulfuré immédiat, ayant pris la forme d'amas, de noyaux métalliques, de « fahlbandes », d'imprégnations ramifiées diffuses et disséminées dans les schistes (souvent eux-mêmes recristallisés par un métamorphisme de profondeur).

La zone métallifère, que nous envisageons ainsi, et dont la traînée continue des roches vertes laisse fortement supposer l'unité, offre, dans deux régions parfaitement tranchées, deux facies totalement différents et qui ont été longtemps considérés sans hésitation comme marquant un âge géologique tout à fait distinct. D'une part, il y a, dans les Alpes ou en Corse, le facies schistes lustrés et terrains cristallophylliens ; de l'autre, on rencontre, dans les Apennins ou en Illyrie et en Serbie, c'est-à-dire dans les Dinarides, le facies strates éocènes à peine métamorphiques.

A cette différence de facies pétrographique correspond une certaine différence métallogénique. Dans les terrains non métamorphisés de la Toscane ou de la Bosnie, les minerais affectent, à peu près exclusivement, le type des dépôts cuivreux immédiatement reliés aux roches basiques. Dans les terrains métamorphiques, on trouve, en outre, le type des imprégnations sulfureuses interstratifiées au milieu des terrains schisteux, en forme d'amas, de stockwerks ou de fahlbandes, à plus grande distance des roches ignées.

Ces différences tendent à s'expliquer si l'on admet qu'un même phénomène, d'âge probablement miocène, a fait, à la faveur des plissements alpins, pénétrer des magmas basiques intrusifs dans une série de terrains antérieurs ramenés à une profondeur plus ou moins grande et, par suite, plus ou moins métamorphisés, en développant, au contact de ces magmas ou dans leur masse même, des ségrégations de minerais oxydés ou sulfurés.

Dans les Alpes orientales, les minerais en question forment une première zone Est-Ouest très importante, entre la région d'Innsbruck, Schladming, Vordernberg et le Semmering. On y trouve des imprégnations de sulfures métallifères, où domine le cuivre (Schwaz, Brixlegg, Kitzbüchel, etc.), ou, plus rarement, le nickel (Schladming). Les minerais d'Eisenerz et de Vordernberg, intercalés par substitution dans un banc calcaire entre la grauwacke dévonienne et les schistes permien, paraissent dériver de pyrites de fer cuivreuses et se trouvent donc à leur place normale au milieu de toutes ces imprégnations sulfureuses, la différence d'allure étant due à la nature calcaire des terrains encaissants. Plus loin, en Styrie, près de Leoben, on trouve les amas de fer chromé de Kraubat dans des dunités, c'est-à-dire un type classique de ségrégation.

Plus au Sud, la zone cristalline des Tauern, à métamorphisme beaucoup plus intense, renferme des imprégnations sulfurées du même genre, parfois un peu cuprifères, parfois légèrement aurifères, ailleurs chargées de zinc, à Zell sur la Zill, Rauris, Sterzing, Waschgang, Gross Fragant, Gmünd, etc., et le contraste est absolu avec les minerais plombo-zinci-

fères que nous avons déjà signalés dans une zone plus méridionale (Bleiberg, Auronzo, Raibl, etc.).

Les Alpes occidentales, et spécialement les Alpes pennines, offrent des caractères identiques. Ici encore nous avons des imprégnations de pyrite et mispickel aurifères arrivant à de véritables diffusions (Pestarena, le mont Rose, Gondo), des fahlbandes nickelifères et cobaltifères comme celles du Val d'Anniviers en Valais, si analogues à celles de Schladming. Mais, à côté de ces imprégnations sulfurées, dont la relation avec les roches basiques reste, en somme, problématique, nous voyons s'accroître le type des ségrégations proprement dites et des dépôts sulfurés tout à fait immédiats, aboutissant à des amas de magnétite, de chalcopyrite, de pyrite et de pyrrhotine nickelifère : par exemple, à Scopello et Varallo le long de la grande traînée Nord-Est des roches d'Ivrée, à Traverselle le long des diorites situées à l'Est du Grand Paradis, à Cogne sur le flanc Nord du même massif; à Usseglio, Balma, sur le flanc Sud, ou à Cruvin, près de Suse.

Dans le Sud des Alpes occidentales, les minerais sont peu développés; mais, quand on arrive à Gênes, on trouve, en rapport avec les roches intercalées dans l'Éocène non métamorphique, tout un groupe important de gîtes cuprifères, qui se continue en Toscane jusqu'à Monte Catini et Rocca Tederighi, et passe, d'autre part, en Corse, où l'on a, avec pareilles roches vertes et semblables minerais associés; les deux faciès de terrains distingués plus haut : éocène non métamorphique et schistes lustrés.

Les mines du district de Gênes, Libiola, Monte Loreto, Gallinaria, etc., renferment toutes des masses irrégulières de chalcopyrite en relation directe avec des roches vertes, diabase, euphotide (ou serpentine produite par l'altération d'une des roches précédentes), et, de même, les gîtes de Ponte Leccia, de Castifao, de Moltifao en Corse, se relient à des diabases associées à de l'Éocène bouleversé, mais non métamorphique, tandis qu'à Linguizetta et Vezzani, dans la même île, le faciès est celui des schistes lustrés.

Monte Catini, que nous décrivons en détail, et Rocca Tederighi sont à peu près les spécimens les plus méridionaux de ce genre de gîtes en Italie. Plus au Sud, les roches vertes disparaissent, à peu près exactement au moment où se montrent les roches éruptives tertiaires d'épanchement, et ne reparaissent guère qu'en Calabre ou en Basilicate, lorsque celles-ci ont cessé, comme s'il y avait incompatibilité entre ces deux manifestations pétrographiques. Il est naturel d'envisager toute la zone intermédiaire à volcanisme superficiel comme une zone déprimée, où s'est conservée la trace de phénomènes montés plus haut dans l'écorce et où manquent, au contraire, par suite, les phénomènes relativement profonds, tels que les intrusions de roches vertes.

L'observation se trouve confirmée de l'autre côté de l'Adriatique, où l'on remarque quelque chose de semblable. Là aussi les roches vertes, dont la traînée est ailleurs si continue, s'interrompent sur la zone affaïssée et éruptive située à l'Est du Bacher Gebirge en Styrie, alors qu'apparaissent, avec les roches éruptives superficielles, tous les minerais de mercure déjà signalés en Carniole et en Carinthie. Puis ces roches vertes reprennent toute leur extension en Bosnie après le massif ancien d'Agram, et s'accompagnent là encore de semblables minerais cuprifères.

δ) — **Zone filonienne des Alpes françaises.** — Pour terminer ce qui est relatif à la métallogénie des Alpes, nous devons signaler encore, à l'Ouest de la Chaîne, une zone métallifère à BGP qui fait à peu près le pendant de la zone toscane à filons sulfurés complexes et qui apparaît dans la Savoie, la Maurienne, le Dauphiné, lorsqu'on dépasse vers l'Ouest les amygdales granitiques du Mont Blanc, du Pelvoux, etc. Là, les interstratifications, les fahlbandes pyriteuses font place de nouveau aux véritables filons, aux fractures, aux décrochements, et, dans le remplissage, on voit, à côté des pyrites de fer, avec cuivre, or ou nickel, reparaître les sulfures complexes plombo-zincifères, comprenant même parfois des traces de mercure. La connexion est la même qu'en Toscane. On a là, presque côte à côte, des pyrites plus ou moins cuivreuses, donnant par altération superficielle le groupe des sidéroses et des cuivres gris d'Allevard, ou de la pyrite aurifère produisant les minerais d'or de la Gardette, des sulfures de nickel et cobalt aux Chalanches, des galènes argentifères à Macot, à Pesey, etc. Les filons, qui recourent des terrains allant jusqu'à la base du Jurassique, sont manifestement reliés aux accidents tertiaires, et, tandis que l'on pouvait hésiter sur l'âge des imprégnations sulfureuses profondes dans la zone axiale, le caractère tertiaire de cette zone latérale à l'Ouest est aussi bien marqué que celui de la zone latérale à l'Est, près de Lucques ou vers Massa Marittima.

ε) — **Zone hercynienne des Maures et de Sardaigne.** — La zone plombo-zincifère des Alpes françaises, qui se continue peut-être en Corse et va ainsi converger vers la zone toscane du Mont Argentario, est bornée à l'Ouest par une autre zone, qui paraît totalement différente et qui marque, sans doute, une métallisation effectuée pendant une période géologique antérieure, pendant la période hercynienne.

Nous avons déjà remarqué, à propos de la Toscane, de l'île d'Elbe, de la région de Lucques ou de Seravezza, que l'on retrouvait là des tronçons d'un ancien massif tyrrhénien, disloqués et métallisés à l'époque tertiaire. Ce massif reparaît plus à l'Ouest, dans les Maures, l'Ouest de la Corse ou la Sardaigne, à l'état de débris épars, où l'empreinte des plis tertiaires s'efface, tandis que celle des accidents hercyniens tend à dominer; nous entrons ici, à proprement parler, dans l'« Avant-pays » des Alpes.

Cet Avant-pays est très métallisé; le petit massif des Maures et la Sardaigne sont deux régions remarquablement riches en minerais. Sur l'âge de ces minerais on peut discuter, et, comme nos déterminations d'âge pour les filons se bornent généralement à une limite minima, on ne saurait affirmer que, là encore, l'influence des métallisations tertiaires ne se soit pas fait sentir. Cependant, la conclusion bien probable des études de détail sur la Sardaigne est que les minerais y sont hercyniens, et, dans la région des Maures, de l'Esterel ou des Alpes-Maritimes, la présence de nombreux sédiments permo-triasiques, où des minerais cuprifères et plombifères paraissent avoir une origine détritique, prouve tout au moins qu'il existait déjà des minerais de ce genre avant le Permien.

On peut rattacher à cette métallisation hercynienne les filons des Borrettes, de la Moure, de Reille, etc., dans les Maures et l'Esterel, ceux d'Argentella à l'Ouest de la Corse, et surtout ceux de la Sardaigne, où se

manifeste, à un degré remarquable, un phénomène déjà signalé plus haut dans le Bergamasque ou les Alpes Orientales : l'influence des contacts entre calcaires et schistes sur la localisation des minerais, avec action superposée des altérations superficielles, qui, en terrains calcaires, ont amené l'allure habituelle des substitutions calaminaires.

Dans toute la Sardaigne, les minerais dominants sont les B. G. P., industriellement les minerais plombo-zincifères, avec manganèse accessoire concentré à la surface comme toujours. Le cuivre et les métaux de ségrégation basique font à peu près défaut, de même que les roches vertes, auxquelles nous les avons vus reliés. Au contraire, les massifs granitiques et les filons latéraux de microgranulite ou de porphyrite abondent au voisinage de ces gisements, qui, dans leur forme primitive, sont des filons de galène et de blende.

L'allure filonienne est, par endroits, très nette, comme autour du massif granitique d'Arbus, que contourment, au Nord, à l'Ouest et au Sud, des filons de plomb (Montavecchio, etc.), mais dans lequel certains de ces filons pénètrent, montrant qu'il ne s'agit pas d'une émanation dérivée de ces granites. Ces filons sont, en principe, bien caractérisés lorsque les fractures ont traversé des terrains inattaquables aux eaux métallisantes ou altérantes, comme des schistes ou du granite. Ailleurs, quand il y a alternance de calcaires ou de schistes, les minerais suivent souvent des contacts et prennent une sorte d'allure interstratifiée. La présence de ces calcaires, et la pénétration des eaux qui en est résultée, ont toujours déterminé la transformation des sulfures en calamines, où souvent on reconnaît encore la disposition des calcaires auxquels elles se sont substituées.

Conclusions. — Si nous cherchons, en résumé, l'application de nos idées générales à la métallogénie italienne, nous aurons donc l'impression que les minerais italiens (sauf ceux de Sardaigne) émanent de roches éruptives mises en mouvement et montées vers la superficie par suite des accidents tertiaires. Les principaux cas, où de semblables cristallisations métallifères se sont produites, semblent être les suivants.

Tout d'abord, dans une zone de rupture longitudinale, qui paraît s'être réalisée entre les plissements nouveaux et leur Avant-pays, il a dû s'effectuer un tronçonnement du massif ancien, par suite duquel ses compartiments juxtaposés ont subi des déplacements relatifs dans un sens ou dans un autre. A la faveur de ces déplacements, les magmas acides ont dû pénétrer dans certaines zones et en refondre progressivement les éléments, se les assimiler de manière à se substituer à eux : d'où est résultée la consolidation profonde de magmas grenus à type granitique, apparus au jour en quelques points où, par suite des mouvements ultérieurs, l'érosion s'est trouvée très avancée.

Sur la périphérie de ces granites, ou du moins de ceux qui paraissent les plus élevés d'entre eux, — qui, tout au moins, étaient les plus chargés de principes volatils et se rapprochaient le plus de nos pegmatites ou granites à mica blanc, — on trouve la trace de fumerolles chlorurées ayant pu donner directement de l'oligiste et des silicates de fer, ayant, en tout cas, donné de l'étain avec du cuivre, des pyrites de fer, etc. (Ile d'Elbe, Campigliese, Gavorrano).

Plus loin des mêmes granites, là où, à ces granites profonds, se substituent, sur les affleurements, les microgranulites et les porphyrites, ont cristallisé les minerais sulfurés complexes de plomb, zinc, fer, etc., principalement dans les cassures produites par les failles ou les décollements entre terrains superposés d'inégale compacité physique, tels que schistes et calcaires (Toscane, région de Lucques, Bergamasque, Carinthie, ou, à l'Ouest des Alpes, Savoie, Maurienne et Dauphiné).

Ailleurs, des pénétrations de roches basiques ont formé des amas et lentilles de diabase, euphotide, etc., dans des terrains d'âges divers, amenés à des degrés inégaux de métamorphisme. Quand ce métamorphisme est le plus avancé, ce qui paraît comporter une profondeur de cristallisation plus grande, les schistes cristallisés renferment souvent des imprégnations sulfureuses à caractère de fahlbandes, formées de pyrite de fer et de mispickel, parfois cuprifères, nickélicifères ou aurifères (Tauern, zone d'Innsbruck, Alpes Pennines, etc.). En même temps, les roches basiques elles-mêmes peuvent renfermer des ségrégations et amas de magnétite ou de fer chromé (Styrie et Val d'Aoste). Les régions à pareilles roches vertes, formées au contraire de terrains non métamorphisés, — par conséquent, selon toute apparence, plus hautes dans la chaîne, — ne renferment guère que des amas de sulfures cuivreux au contact des diabases (district de Gènes et Toscane).

En approchant des zones déprimées à manifestations éruptives superficielles, tous les métaux disparaissent progressivement à l'exception du mercure, qui domine, avec l'antimoine, dans la zone immédiatement contiguë aux roches éruptives d'épanchement (Carniole, Frioul, Toscane). Et, enfin, les parties où le volcanisme est encore actif et celles où son activité, toute récente, se traduit par des cratères conservés, semblent trop peu érodées pour montrer encore au jour aucun gîte métallifère (Campagne romaine, province de Naples et Sicile).

4° PROVINCES MÉTALLOGÉNIQUES D'ASIE

Le continent asiatique va nous confirmer les lois précédemment établies, et, plus particulièrement, il nous offrira des conditions favorables : d'abord, pour manifester le contraste entre le type des métallisations profondes réalisées par imprégnation diffuse dans le *retour en profondeur* qui accompagne les plissements et celui des incrustations plus superficielles dues à des dislocations disjonctives ; ensuite, pour faire ressortir les effets d'un *caractère continental*, qui a été très anciennement accusé par de vastes parties de ce continent¹.

Distribution générale des provinces métallogéniques en Asie. — Restant d'abord dans les généralités, si l'on voulait représenter par un schéma grossier la façon dont nous concevons le problème métallogénique en prenant seulement ses exemples en Asie, voici comment on pourrait synthétiser les faits.

Les types de profondeur, qui caractérisent les plates-formes primitives, se trouvent en Asie dans le continent de l'Angara Sibérien, le continent du

¹ Voir pour les développements, *la Géologie et les Richesses Minérales de l'Asie*.

Gondwana Indou, le massif sinien de la Corée et du Petchili, etc. Là, les métallisations du type *a* précèdent¹ comprennent : d'abord, des imprégnations pyriteuses extrêmement multipliées, qui, par endroits, ont rempli, de leurs innombrables veinules interstratifiées, les terrains schisteux, et qui, ailleurs, ont pu se condenser en de grandes masses, dont nous assimilons la cristallisation, homogène sur une grande étendue, à celle des magmas granitiques. La présence fréquente de l'or, parfois celle du cuivre ou du nickel, dans de telles provinces métallogéniques, leur prête un intérêt particulier.

Mais, il est arrivé localement que de tels massifs anciens aient été redислоqués à une époque ultérieure et aient alors donné lieu à des manifestations éruptives plus récentes. On doit, le long de ces zones de dislocation, s'attendre à trouver les mêmes gisements filoniens qui, dans la période de dislocation en question, pouvaient se multiplier un peu plus loin et dont nous allons bientôt voir la forme, rattachée plus haut au type *b*.

Des dislocations de ce genre, très fréquentes sur les massifs hercyniens, ont, par exemple, donné lieu à certaines zones métallifères tertiaires dans notre Plateau Central. Elles sont plus rares dans les plates-formes primitives de l'Asie, dont la consolidation, étant plus ancienne, est plus parfaite. Il en existe cependant des cas dans l'Inde.

2° En second lieu, à une hauteur plus grande dans l'écorce, plus près de la surface, nous admettons qu'il s'est produit une abondance spéciale, d'abord de ces roches si caractéristiques, à quartz isolé et souvent à mica blanc, auxquelles on donne en France le nom de granulites, puis de granulites exceptionnelles à tendance microgrenue et à allure filonienne, enfin de microgranulites proprement dites passant, dans les parties encore plus hautes, à des diabases ophitiques, porphyrites, etc. Ces trois groupes de roches, qui tendent toutes déjà à se former en filons ou en dykes intrusifs plutôt qu'en masses continues et homogènes, sont particulièrement bien représentés sur toute la longueur des chaînes, dites hercyniennes, dont nous trouvons les représentants asiatiques dans l'Oural, la steppe kirghise, l'Altai, l'Indo-Chine et la Chine Sud-occidentale, la presque île de Malacca, et même sur le versant oriental du continent hindou, etc. (type *b*). Aux granulites en masse, que nous considérons comme occupant la base de ce groupe, sont souvent associés, d'une façon particulièrement nette, les gîtes d'étain, et le Sud-Est de l'Asie nous offre, à cet égard, un champ d'études excellent.

Nous rattachons à la série des microgranulites plus superficielles, qui passent souvent à des types ophitiques ou même microlithiques (diabases ophitiques et porphyrites), le groupe si abondant des filons concrétionnés complexes plomb-zincifères, plus rarement cuprifères, dont les représentants asiatiques se rencontrent dans la steppe kirghise, la Transbaïkalie, quelques parties du Yunnan, du Sé-Tchouan, du Tonkin, etc.

Le long de certaines roches de ce groupe, il s'est parfois produit des minerais de contact du type Banat, pouvant être associés à des roches d'âge, tantôt hercynien, tantôt (et plus souvent) tertiaire (types *b* et *e*). Nous retrouvons, par exemple, en Asie, dans le Turkestan russe, de sem-

¹ Voir la définition de ces types *a*, *b*, *c*, page 254.

blables auréoles de contact dans une zone où il existe, en même temps, d'assez nombreux filons plombo-zincifères, probablement tertiaires.

3° Plus haut dans l'écorce, nous arrivons à ce que nous croyons être la base des chaînes récemment plissées, dans une zone où, le long de dislocations qui ne sont pas nécessairement associées aux plissements, mais qui ont pu les morceler par endroits, se sont manifestés des épanchements rocheux à types microlithiques. Là apparaissent les grands massifs et dykes d'andésite, trachyte, etc. L'Asie nous fournit d'excellents spécimens du type Hongrie ou Colorado (*e*) dans le Japon. Nous rencontrons, en Arménie et dans l'Anti-Caucase, des formes analogues, mais peut-être parfois un peu supérieures dans la coupe de notre schéma (parce que plus récentes) : le type des gisements cuivreux en connexion avec des diabases, andésites, etc. (Anti-Caucase), et le type plus complexe plombo-zincifère, auquel correspondent les gîtes algériens et, plus généralement, méditerranéens (*d* et *f*).

4° Enfin, les chaînes plissées proprement dites, dans lesquelles les dislocations disjonctives, les décrochements et les coulisses d'effondrement ne jouent qu'un rôle insignifiant, se présentent, comme toujours, fort mal en ce qui concerne les gîtes métallifères, surtout si l'on fait abstraction des minerais remontant à une phase de cristallisation et de plissement antérieure, qui peuvent reparaître accidentellement, au cœur de la chaîne, sur des noyaux ramenés au jour après leur métallisation profonde (types *a* ou *b*). L'absence complète de minerais, qui caractérise notre Jura, se retrouve dans les chaînes analogues à plissements réguliers et rectilignes, qui occupent le versant N.-E. du Caucase et, de même, dans certaines parties de l'Himalaya.

La plupart des gisements miniers du Caucase proprement dit se trouvent, comme ceux des Alpes, le long d'un noyau ancien qui occupe la crête. L'anti-Caucase, au contraire, présente le type des gisements cuivreux associés à des diabases mélaphyriques qui rentrent dans notre troisième groupe.

Nous devons également rappeler que les zones à volcans actuels sont, pour une raison pareille, pauvres en minerais, sauf là où ces minerais remontent à une phase éruptive antérieure (comme dans les cas du Japon et de l'Arménie, qui viennent d'être cités). Les axes volcaniques de l'Asie, si curieusement continus, si bien tracés dans l'Insulinde, sont instructifs à cet égard.

La profondeur originelle, dont nous venons de parler, n'est pas seule à intervenir et seule à différencier des provinces métallogéniques d'après leur âge de formation. Il faut aussi tenir compte de l'évolution qui a pu s'accomplir, avec le temps, dans l'allure des phénomènes orogéniques. Nous insistons sur cette idée¹ que la métallisation est généralement liée, ou à un retour en profondeur, avec prédominance des phénomènes ignés (groupes 1 et, en partie, 2, correspondant à *a* et *b*), ou, beaucoup plus souvent (groupes 3 et 4, ou *c*, *e*, *f*), à des accidents de dislocation avec prédominance de phénomènes hydrothermaux (les plissements proprement dits étant stériles). Or, nous croyons, d'autre part, que les disloca-

¹ Voir Chap. III page 70.

tions importantes et étendues sont une forme relativement récente des manifestations orogéniques, ayant eu une tendance à s'accuser de plus en plus à mesure que l'écorce se consolidait davantage et devenait moins apte à se prêter, par un ramollissement profond, par une refusion même, aux plissements proprement dits. Nous sommes donc amenés à penser que beaucoup de gisements, constatés sur une chaîne de plissements ancienne, y ont été produits, non au moment de son plissement, mais dans les dislocations ultérieures, résultant d'un mouvement orogénique, dont la forme plissée s'était localisée ailleurs dans une zone plus étroite; en sorte qu'il faut distinguer avec soin, dans le cas de telles zones redислоquées, l'âge de la métallisation de celui de la chaîne.

Envisageons maintenant quelques grandes provinces métallogéniques d'Asie.

I. **Sibérie.** — En Sibérie, on peut établir une première grande classification tectonique des diverses régions suivant l'âge des plissements principaux dans la région considérée. Comme nous l'avons fait remarquer à diverses reprises, cet âge plus ou moins ancien a surtout pour conséquence une érosion plus ou moins avancée : par conséquent, une profondeur plus ou moins grande de la section horizontale que cette érosion met aujourd'hui au jour; autrement dit, des portions de gisements utilisables pour nous. Il faut ajouter, ce qui est non moins important, une seconde distinction basée sur l'existence ou la non-existence des fractures de dislocation produites, après les plissements, par le contre-coup disjonctif des mouvements réalisés à distance dans une chaîne plissée ultérieure.

En se bornant tout d'abord à envisager ces deux points principaux, on peut, géologiquement, et en dehors de toute considération métallogénique, distinguer, en Sibérie, des plissements appartenant aux trois groupes : α) précambrien et calédonien; β) hercynien, γ) tertiaire.

α) Les véritables zones précambriennes sont peu visibles, étant d'ordinaire masquées par un manteau horizontal de terrains primaires, et nous fournissent peu de minerais utiles. D'ailleurs, là où elles se présentent, leurs conditions de métamorphisme et d'imprégnation métallifère ne diffèrent pas sensiblement de celles qui ont pu être réalisées dans des chaînes ultérieures, telles que la chaîne calédonienne, également ramenées en profondeur par un plissement très ancien et pénétrées de magmas ignés à structure granitique, en même temps que de fumerolles métallisantes. Pour la métallogénie, ce n'est pas, nous l'avons indiqué en passant, l'âge des phénomènes qui détermine leur type, mais les conditions de profondeur et de dislocation auxquelles cet âge correspond en moyenne; et, du moment que des terrains ont pris par métamorphisme le facies archéen, quel qu'en soit l'âge réel, ils deviennent pour nous équivalents à de l'archéen proprement dit. Nous ne pouvons donc pas établir de distinction essentielle entre les deux premiers groupes, auxquels nous rattacherons le type de gisements aurifères, si fréquent en Sibérie comme dans tous les semblables massifs anciens, qui consiste en imprégnations interstratifiées et diffuses de pyrite aurifère, ou en veines lenticulaires de quartz avec pyrite aurifère également intercalées dans la stratification : impré-

gnations et lentilles, dont nous avons eu ailleurs l'occasion de montrer le lien d'origine avec les granites. C'est le type métallogénique ordinaire des gisements de l'Inéisséi et de la Léna, qui correspond à notre type *a* d'Europe. Ils sont généralement trop disséminés sous leur forme primitive pour être utilisables autrement qu'après destruction et remaniement dans les placers. A plus forte raison encore que l'or, les métaux, qui peuvent se trouver associés avec lui, à l'état d'imprégnations sulfurées, sont d'habitude, en ce genre de gisements, trop peu abondants pour être exploitables dans les conditions industrielles de la Sibérie et n'ont pas été signalés.

β) Il y a lieu d'envisager ensuite les zones hercyniennes plissées, mais peu ou pas disloquées postérieurement. Sur ces zones plissées, on se retrouve, à la profondeur près, dans des conditions analogues à celles que nous venons d'indiquer pour les chaînes plus anciennes, et l'on pourra donc rencontrer de même des imprégnations, prenant ici la forme de filons-couches, dont l'Altaï offre des exemples instructifs. Mais, la profondeur originelle ayant été moindre, on rencontrera, à côté du type pétrographique des granites, le type, plus superficiel, des microgranulites et porphyrites, auxquelles commencent à s'associer les métaux du groupe plombo-zincifère, avec tendance à se concentrer sur des fractures, à l'état de filons (dont les filons-couches, comme ceux de l'Altaï, analogues à ceux des Pyrénées, sont déjà un premier exemple). Ces mêmes zones pourront nous offrir des minerais de ségrégation ferrugineux associés à des roches acides, tels que ceux de l'Oural ou du Sud de Minoussinsk. A cet ordre d'idées se rattachent les gisements de la Steppe kirghise, de l'Altaï russe, de l'Alataou de Kouznetsk et des monts Sayan (type *b* précédent).

γ) Des zones hercyniennes, redisloquées par les mouvements tertiaires et divisées par ceux-ci en séries de horsts et coulisses d'effondrements, avec fractures filoniennes, nous offrent le genre de gisements auquel nous sommes habitués sur la plupart de nos voussoirs hercyniens de l'Europe centrale, dans le Plateau Central, les Vosges, la Bohême et la Saxe (type *c*) : système de filons à sulfures complexes, dont nous avons ici les meilleures types dans le district de Nertchinsk et en Transbaïkalie. Des gisements d'or peuvent s'y associer, notamment en Transbaïkalie, sous la forme de filons analogues à ceux du groupe auro-stannifère, avec association aux granulites et aux aplites. A mesure que les venues éruptives tertiaires tendent à prendre de l'importance dans ce groupe, il peut s'y joindre des minerais récents d'un type encore plus superficiel, tels que ceux rattachés aux rhyolithes, andésites, etc. (type *e*), dont nous commençons à trouver des exemples en nous rapprochant de la mer d'Okhotsk, et qui annoncent là le type destiné à dominer au Japon et dans les guirlandes d'îles de l'océan Pacifique.

II. **Oural.** — Les données tectoniques, qui peuvent faire prévoir la métallogénie de l'Oural, sont, avant tout, les suivantes : 1° L'Oural est une chaîne hercynienne Nord-Sud, superposée, comme un pli posthume, à de plus anciens plissements de même direction et faisant partie d'une très large zone plissée, qui commence dès la plate-forme scandinave, à l'Ouest, et se continue probablement sous le Quaternaire, à l'Est, vers la plate-forme

sibérienne d'Irkoutsk ; 2° Il y a eu, sur cet alignement Nord-Sud, dont la direction ne nous étonne que par une généralisation trop rapide des observations faites dans l'Europe centrale, des premiers plis précambriens, reproduits pendant le Silurien, puis vers le milieu du Carbonifère, à la fin du Permien et ayant pu avoir encore quelques faibles échos ultérieurs ; 3° Tant par suite de sa superposition aux plis antérieurs que par sa situation au centre d'une immense zone partout plissée de même, l'Oural n'affecte pas les caractères d'autres tronçons hercyniens, qui se sont trouvés pris et laminés entre deux voussoirs primitifs très rapprochés. Son éloignement des accidents alpins et postérieurs l'a mis également à l'abri des dislocations provoquées, en d'autres cas, sur des horsts hercyniens, par le choc des grandes vagues venues des Alpes ou de l'Himalaya.

Malgré les mouvements plus récents dont l'Oural peut présenter la trace locale, on ne doit donc pas s'attendre à y trouver le type des larges cassures métallisées qui constituent les filons d'incrustation de la Saxe, du Harz, de la Bohême, de la Meseta espagnole, etc., et dont nous avons vu un certain équivalent dans la steppe kirghise, l'Altaï, le district de Nertchinsk, etc., pas plus qu'on n'y observe les roches d'épanchement volcanique, ni les bassins tertiaires effondrés qui sillonnent ces vieux massifs. Les gisements métallifères doivent, en principe, y remonter aux mouvements dévonien et carbonifères, — sinon à des accidents antérieurs ayant pu laisser déjà leur empreinte, comme on l'observe dans la plupart des chaînes plissées, où il existe des manifestations attribuables à deux périodes distinctes.

L'érosion a puissamment travaillé sur ces gisements primaires ; elle a surtout entaillé le versant Est de l'Oural, réduit presque à une pénélaine, où se sont trouvées mises à nu les traînées de roches profondes avec minerais connexes. Les gisements ont donc toutes les chances d'appartenir là à des types de profondeur, sans être toutefois aussi profonds que dans les plates-formes primitives de Scandinavie ou du Canada.

Nous y rencontrons, en effet, des formations, dont les principales se rattachent à la mise en place des magmas à structure granitique ou microgranitique et aux auréoles de métamorphisme qui accompagnent cette mise en place dans les sédiments encaissants, notamment dans les calcaires. Les principaux de ces gisements, ceux de magnétite avec chalcopyrite, peuvent être considérés comme remplissant, au contact des magmas microsyténitiques dont ils dérivent, et le long des enclaves prises dans ces magmas, des fractures ayant souvent l'allure de filons-couches, avec accompagnement ordinaire de roches à grenat et à épidote dues à la réaction interne sur les calcaires encaissants. Ils se différencient par là des minerais assez analogues que l'on trouve en Scandinavie et que l'on est tenté de leur comparer : minerais dérivés de roches très basiques et formant, au milieu d'elles, des amas de ségrégation, comme les fers chromés des serpentines. Dans l'Oural, la zone des roches basiques est distincte de celle des gisements de fer et située en moyenne plus à l'Ouest ; elle ne renferme ni fer ni cuivre, mais d'autres métaux de ségrégation basique, comme le platine, l'or ou le chrome. Au contraire, les magnétites de l'Oural ne présentent ni le nickel, ni le titane habituels aux ségrégations scandinaves ; on leur trouverait des équivalents dans les

cicatrices tertiaires à suture de roches cristallines, dont le Banat fournit l'exemple le plus classique.

Un type de gisements tout à fait différents, qui existe encore dans l'Oural, présente des caractères filoniens plus accusés, sans ressembler pourtant en aucune façon aux filons concrétionnés du groupe plombifère, que nous considérons comme ayant occupé en moyenne une position plus élevée dans la hauteur des plissements orogéniques. Ce sont des craquelures minces et multipliées, ayant plus ou moins l'allure d'un stockwerk, comme en présentent les gîtes stannifères (dont il n'existe pourtant pas ici de représentant) : filons dont le minerai principal est un minerai d'or, qui apparaît à Bérézovsk, Kotchkar, etc., comme cela lui arrive très souvent ailleurs, dans des conditions analogues à celles du groupe stannifère, en dérivations presque immédiates d'un magma acide, en dépôts chlorurés ou fluorés des granulites. On semble voir là, autour des magmas à structure granitique (syénites et microsénites), qui ont dû provoquer une auréole immédiate de chlorures de fer donnant les magnétites, une auréole un peu plus excentrique (c'est, en effet, sa position géographique), dans laquelle les dépôts de roches plus chargées de carbonates alcalins, à magma plus fluide comme les granulites, ont été accompagnés de fumerolles aurifères fluorées, avec quelques sulfures, comme la galène, commençant à apparaître.

Enfin, certaines régions de l'Oural, dont la plus célèbre est celle de Miask et des monts Ilmen, offrent toute cette famille de minéraux remarquablement caractérisés, qui se rattachent, eux aussi, aux magmas granulitiques : les émeraudes, les topazes, les corindons, etc.

En tout cela, la métallogénie de l'Oural présente : tantôt certains caractères qui la rapprochent des gisements tout à fait primitifs (ségrégations basiques, gemmes associées aux granulites comme au Canada, etc.), tantôt des caractères qui annoncent déjà des phénomènes filoniens proprement dits, mais en connexion plus intime avec les magmas éruptifs que ne le sont les filons plombifères et mercuriels. Les types des filons ouraliens peuvent accuser une zone de cristallisation plus profonde que ces derniers, sans qu'apparaisse pourtant ici le groupe si caractéristique de l'étain.

On peut ajouter que l'érosion très avancée de l'Oural, qui a déterminé l'aspect orographique du pays, se traduit par une altération très forte des gisements superficiels : altération leur donnant parfois, comme dans le cas des gîtes de cuivre, leur forme industrielle, mais ne descendant pas à des profondeurs aussi grandes que dans les pays dont le relief est resté plus accidenté.

III. Caucase. — La métallogénie du Caucase confirme l'idée générale que l'on peut se faire en étudiant, dans le même ordre d'idées, les autres chaînes récemment plissées, comme les Alpes, le Jura, les Pyrénées, etc. Tant qu'on reste dans la véritable chaîne de plissements récents, indépendamment des noyaux plus anciens que cette chaîne a pu s'incorporer, les minerais sont rares. Quand ils apparaissent, c'est souvent sous la forme de filons-couches ayant une tendance fâcheuse à s'éparpiller. Entre les deux formes qu'ont pu prendre les manifestations tectoniques, plisse-

ments et déplacements verticaux, les premiers impliquent évidemment d'une façon bien plus directe une compression et correspondent, en outre, à une zone de l'écorce plus élevée, plus superficielle : double raison pour être plus pauvres en métaux. Sans doute, quand on se hasarde à de semblables réflexions générales, il faut tenir compte des conditions industrielles qui rendent plus difficile l'exploitation des minerais situés à de fortes altitudes, surtout dans des chaînes peu explorées comme le Caucase, et qui peuvent contribuer à les faire paraître rares. Néanmoins la remarque semble à retenir, et l'on en retrouverait l'application dans l'Himalaya. Elle apparaît avec une netteté spéciale quand on envisage une zone simplement plissée, sans intervention de roches éruptives ni retour à la surface de noyaux anciens disloqués : zone, dont le Jura français fournit le meilleur type et dont le Daghestan nous donne ici un certain équivalent.

Il suffit de reporter, sur une carte géologique du Caucase, les principaux gisements métallifères connus, pour voir le rôle joué dans la métallogénie de cette chaîne : d'un côté par la zone cristalline et paléozoïque, qui constitue, suivant la crête, un noyau ancien, où la plupart des filons du Caucase proprement dit sont concentrés ; de l'autre, par des roches demi-profondes du groupe des diabases, mélaphyres, andésites quartzifères, etc., qui ont été accompagnées par de très importantes manifestations cuprifères, formant la principale richesse métallique de l'Anti-Caucase. On connaît, en outre, quelques rares filons dans les sédiments secondaires plissés, mais seulement assez pour montrer la possibilité théorique d'un phénomène qui n'a donné lieu à aucun gisement important.

IV. Turkestan russe. — Le Turkestan russe peut être divisé, pour notre sujet, en deux régions distinctes : l'une vers l'Ouest et le Sud, à plissements réguliers, qui ne renferme, en fait de gisements métallifères connus, que des poudingues aurifères tertiaires, produit d'une destruction exercée sur des filons antérieurs situés probablement plus à l'Est ; l'autre, toute différente, et très métallisée, au Nord du Syr-Daria, dans le massif montagneux situé entre Tachkent, Kokand et le lac Balkach, sur le prolongement du Tien-chan. Ici la tectonique nous montre le conflit général de deux directions N.-E. et N.-W., qui se rencontrent en une série de redents, de dents de scie successives, dans des conditions que nous sommes habitués à voir, en des pays très divers (Harz, Plateau Central, etc.), provoquer souvent, par un effet de torsion disjonctive, des dislocations métallisées. En fait, Mouchketov a pu dresser, des filons contenus dans ce massif, de longues listes.

Mais les gisements peut-être les plus typiques de cette région appartiennent à ces auréoles de contact autour des syénites ou diorites encaissées dans les calcaires, dont le Banat fournit les types les plus classiques et dont nous venons de retrouver un équivalent probable dans l'Oural. Cette chaîne, avec ses gisements de sel et de pétrole tertiaires et ses minerais de contact dans des terrains crétacés ou tertiaires, offre donc d'assez nombreuses analogies métallogéniques avec certaines régions des Carpathes et contraste, au contraire, avec la steppe kirghise, comme avec la plate-forme primitive de l'Angara.

V. **Asie Mineure et mer Egée.** — Tectoniquement, on peut dire en deux mots que l'Asie Mineure est une zone récemment plissée de l'écorce, où les plissements paraissent s'être souvent compliqués d'effondrements, ayant pu jouer un rôle capital en ce qui concerne les venues éruptives ou métallissantes. Vers l'Ouest, dans la mer Egée, ces effondrements dominent, avec une allure souvent transversale sur les plis qu'ils ont tranchés à l'emporte-pièce. Dans la partie occidentale ou centrale de ce pays, des effondrements analogues semblent d'abord affecter souvent une disposition longitudinale, et le principal d'entre eux, celui de la Lycaonie, occupe un bâillement entre deux arcs plissés, avec ceinture de roches éruptives. Après quoi, on retrouve, à l'Est, dans le plateau arménien, un système de compartiments juxtaposés à mouvements verticaux indépendants, jusqu'à un certain point homologue de la mer Egée. Rien, dans tout ceci, n'est essentiellement différent de ce qu'on observe, en général, dans le bassin méditerranéen : et, ce sont, en effet, les caractères métallogéniques, que nous avons appelés plus haut méditerranéens, qui tendent à dominer, dans la plus grande partie de l'Asie Mineure occidentale et dans la mer Egée, comme ils le font ailleurs en Algérie, en Sardaigne, ou même dans l'Italie continentale. C'est ainsi que nous rencontrons de préférence ici les deux types de gisements représentés : le premier, par les formations plombo-zincifères de contact entre deux terrains inégalement perméables, avec développement spécial dans les calcaires ; le second, par les minerais de fer chromé inclus dans les serpentines éocènes. Beaucoup des filons d'Asie Mineure présentent la même inconstance en profondeur que les gisements analogues d'Algérie, des Pyrénées, etc.

Ce ne sont pourtant pas les deux seules catégories de gisements connues dans cette région. Ayant, notamment dans toute l'Arménie, mais aussi dans diverses autres parties de l'Asie Mineure et de la mer Egée, des chaînes plissées tertiaires à érosion relativement avancée avec développement de roches éruptives, on pouvait s'attendre à y trouver le type de filons complexes cupro-plombo-zincifères dont l'Algérie nous fournira bientôt des exemples nombreux. Milos offre, comme le Caucase, des minerais plombo-argentifères reliés à des roches éruptives tertiaires suivant un processus habituel dans l'Ouest américain. D'autre part, des filons d'antimoine, assez nombreux dans l'Anatolie occidentale et exceptionnellement accompagnés de mercure, peuvent également rappeler certains types algériens. Les minerais de cuivre reliés aux roches vertes, analogues à ceux des Apennins, apparaissent notamment à Arghana Maden. Il faut enfin remarquer que, dans cette zone plissée récente, il s'intercale certainement des noyaux plus anciens, manifestés par la réapparition de traînées primaires ou cristallophylliennes, dans lesquelles nous pourrions rencontrer des exemples de minerais appartenant à des venues primaires et représentés, dès lors, par des types accusant une profondeur de cristallisation plus grande.

VI. **Inde.** — Si l'on se rappelle de la tectonique indoue les points les plus importants pour la métallogénie, on aperçoit d'abord aussitôt une première coupure essentielle à établir entre les zones septentrionales à plissements tertiaires qui se rattachent aux plis Himalayens et les zones méridionales à plissements primaires et secondaires.

péninsulaire avec Ceylan, sa prolongation naturelle, non influencée, sous la forme de plissements, par ces mouvements récents, qui sont venus simplement se mouler sur elle en la contournant. Ce sont deux mondes entièrement différents, dont l'un forme la suite des chaînes de l'Asie Mineure, du Caucase, de l'Iran, etc. et participe à leurs caractères essentiels, tandis que l'autre constitue une sorte de grand horst massif, plutôt comparable à certains égards, en Europe, à la Scandinavie ou, en Asie septentrionale, au continent de l'Angara, que nous avons précédemment étudié : plus analogue encore au Canada. Cependant, comme il n'est peut-être pas deux contrées au monde qui soient totalement identiques par leur constitution, certaines observations sont aussitôt à ajouter pour préciser ce premier aperçu sommaire.

C'est ainsi que, si nous prenons d'abord le groupe des chaînes himalayennes, toute leur partie centrale ressemblera plutôt à une chaîne plissée à nombreuses intercalations de zones archéennes ou fortement métamorphisées qu'à une chaîne à la fois plissée et disloquée, comme c'est le cas en Asie mineure. L'érosion en est peu avancée. Les roches éruptives sont rares. Les minerais sont également peu abondants, et ceux que l'on connaît reproduisent parfois simplement les conditions tectoniques des zones métamorphiques anciennes englobées dans les plis récents. Leurs conditions d'exploitation trop difficiles ont, du reste, détourné de les chercher avec activité, en sorte qu'ils sont mal connus.

Les branches divergentes à direction N.-S., qui, à l'Est comme à l'Ouest, se coudent pour englober le massif primitif, présentent des conditions un peu différentes.

D'autre part, dans le massif primitif lui-même, il faut distinguer ce qui est resté réellement inébranlable dans les plissements ultérieurs et, au contraire, les parties qui ont pu être influencées par ceux-ci : soit sous la forme plissée, dont les Ghates orientales nous offrent un exemple singulier, soit surtout sous la forme de dislocations tertiaires.

La masse archéenne proprement dite offre toute une série d'imprégnations interstratifiées, que nous attribuerons à des phénomènes d'intrusion profondes analogues à ceux qui ont produit le métamorphisme gneissique lui-même. On peut considérer, d'une part, les filons-couches de pyrite aurifère, ou parfois cuprifère, de l'autre, les veines de pegmatite, avec minéraux et gemmes cristallisés et, sans doute, avec graphite, comme des épisodes naturels de ce métamorphisme. Peut-être faut-il y rattacher également, — mais d'une façon plus indirecte, — d'autres filons-couches manganésifères. Enfin nous aurons à signaler des minerais de fer oxydé de type scandinave dans cette série métamorphique complexe, dont les termes peuvent être plus ou moins acides ou basiques suivant la nature des sédiments cristallisés.

Les venues granitiques et pegmatoïdes de l'Inde péninsulaire ne sont, pas plus que celles de la Sibérie centrale ou celles de l'Oural, accompagnées de venues stannifères. Il faut, pour trouver l'étain de l'Inde, aller en Birmanie, dans une région nettement influencée par des mouvements plus récents (carbonifères ou permians), comme, en Asie Russe, il faut aller chercher la Transbaïkalie.

Quant à l'effet des accidents ultérieurs, il se traduit, sur une simple carte géologique, par deux phénomènes qui montrent, en même temps, les régions où il faut en chercher l'effet métallogénique. Ce sont ces sillons de fracture, où se sont effondrés les terrains du Gondwana au milieu des massifs primitifs, et ce sont aussi les épanchements laviques des trapps, qui ont été la conséquence de mouvements semblables. Il est évident que, là où de telles fractures se sont produites et surtout là où leur contrecoup sur l'activité éruptive interne s'est traduit par la montée de roches éruptives, on peut rencontrer des minerais filoniens, tels que ceux qui dérivent habituellement de phénomènes semblables. Et l'on aura particulièrement de chances d'en voir, suivant une remarque tout à fait générale, non pas dans les zones superficielles, où les grandes nappes de trapp sont restées intactes, mais plutôt dans les sillons effondrés, ramenés en profondeur, où les terrains du Gondwana se sont trouvés préservés, et dans les quartiers brisés où les trapps ne se manifestent que par leurs cheminées ascensionnelles.

Or la carte de l'Inde manifeste trois grands sillons semblables jalonnés par des terrains à combustibles, dans le Chota Nagpore et les provinces centrales. Au voisinage de ces dislocations, on voit reparaître parfois des types filoniens, qui, dans la partie réellement solide de la péninsule, font à peu près défaut.

D'autre part, certains types de filons aurifères, dispersés en innombrables craquelures dans le district de Kolar, rappellent un peu ce que nous avons trouvé dans l'Oural à Kotchkar, Bézovsk, etc.

Il faut ajouter à ces généralités la présence de ces immenses nappes de trapps qui sont un trait si marquant de la géologie indoue. La venue de ces roches se rattache à une série de dislocations qui ont commencé pendant le secondaire et se sont accentuées au moment des grands soulèvements himalayens. Le long des rivages de l'Inde, comme le long de ceux de l'Afrique australe, on constate des traces de jurassique marin, ou ailleurs de crétacé, accusant les effondrements successifs, qui ont fini par rompre l'unité du contingent indo-malgache. Ces venues de trapps, comme la plupart des épanchements éruptifs récents, ne contiennent pas, en général, de minerais proprement dits ; mais on peut y rattacher quelques substances minérales d'un type spécial, en rapport probable avec des altérations superficielles, comme les bauxites, auxquels nous proposerons de joindre certains minerais de manganèse. Il est à remarquer combien peu ces mouvements ont été accompagnés par des effondrements internes avec manifestations métallifères connexes, telles qu'on en trouve dans d'autres massifs centraux appartenant déjà à des chaînes plus récentes, comme notre chaîne hercynienne d'Europe.

VII. Malacca et Insulinde. — Les caractères généraux de la tectonique dans ces régions sont les suivants. Elles ont subi, vers l'époque carbonifère et permo-triasique, des mouvements importants, accompagnés de manifestations ignées, qui peuvent les faire rentrer, pour la plus grande partie, dans le groupe des chaînes que nous appelons ici hercyniennes, et dont nous avons déjà eu l'occasion d'énumérer les conditions métallogéniques les plus caractéristiques. Ultérieurement, il y a eu une longue

période d'émergence continentale, et, par conséquent, d'érosion, de mise à nu des magmas profonds : période qui, d'abord, s'est accompagnée de quelques sédimentations terrigènes, saumâtres ou lagunaires et, plus exceptionnellement, surtout quand on remonte vers la Chine, de dépôts marins localisés. Puis, ces sédimentations mêmes ont complètement cessé à partir du jurassique moyen, sauf certains remplissages de bassins lacustres vers le pliocène.

Dans la dernière période, les terrains ont subi des mouvements orogéniques, qui se sont manifestés, suivant les zones, avec plus ou moins d'intensité et avec des caractères différents, entraînant, dès lors, des localisations métallogéniques.

Sur certaines zones faibles, il y a eu production de véritables chaînes plissées tertiaires (Birmanie, Archipel Malais, etc.)

Presque partout ailleurs, les mouvements se sont bornés à la production de grandes ondulations très amples avec flexures, qui ont pu cependant être accompagnées de cassures métallisées, comme cela s'est produit un peu partout dans le monde pour les vousoirs hercyniens tronçonnés par le choc des plissements alpins (type *c*).

Enfin, sur certaines zones déjà plissées par les mouvements antérieurs, les mouvements tertiaires se sont à leur tour accumulés sous la forme de plissements nouveaux, comme dans la région montagneuse de l'Ouest du Sé-tchouan.

Dans la chaîne dite de Malacca (Birmanie, États confédérés, Bangka et Billiton), la caractéristique métallogénique est, avant tout, la présence de l'étain. On peut seulement ajouter, à titre accessoire, la présence d'un peu d'or, et celle de pierres précieuses, liées aux roches cristallines dont l'étain est lui-même le satellite, comme les rubis et saphirs de Birmanie et du Siam. L'étain, dont la présence, très fréquente sur toute la longueur de la zone en ce moment considérée, marque son unité, en même temps qu'il constitue sa richesse, y est toujours dans les mêmes conditions, lié aux roches granitiques relativement superficielles, souvent appelées en France granulites, que caractérisent l'isolement des quartz, la présence fréquente du mica blanc et, plus généralement, la présence des principes minéralisateurs (type *b*).

Dans les Indes néerlandaises, on a d'abord des tronçons de chaînes anciennes, que l'on peut qualifier par extension d'hercyniennes, avec terrains métamorphisés par le granite, où nous pouvons nous attendre à rencontrer les minerais ordinairement associés à la mise à nu des granites, tels que l'étain et accessoirement l'or, avec, plus exceptionnellement, des filons anciens du groupe plombo-zincifère. Les principaux spécimens de gîtes stannifères se présentent dans les petites îles fameuses de Bangka, Billiton, etc. ; on retrouve leur équivalent restreint à Sumatra et à Bornéo. Pour l'or, il est actuellement difficile de préciser quels gisements se rapportent à ce groupe hercynien, la plupart étant certainement de formation tertiaire : peut-être quelques-uns au Sud de Bornéo.

En second lieu, nous avons, dans beaucoup de ces îles, des roches vertes serpentineuses, remarquablement abondantes. A celles-ci peuvent se rattacher les minerais de fer, chrome, nickel et platine qui les accom-

pagent si fréquemment. Pour rencontrer des masses importantes de nickel reliées aux serpentines, il faut atteindre la Nouvelle-Calédonie.

Enfin, les chaînes de plissement tertiaires, avec dislocations éruptives connexes, sont également très représentées et comportent de nombreux filons complexes, analogues à ceux de l'Ouest américain ou du Japon.

VIII. Tonkin. — Les gisements du Tonkin comprennent, d'abord, des filons de quartz aurifère avec alluvions connexes et des filons stannifères, que l'on peut considérer comme représentant les conditions métallogéniques déjà rencontrées dans la presqu'île de Malacca, en Annam, etc., partout où l'on a de même, dans l'Asie Sud-Orientale, un massif ramené en profondeur à la fin de l'époque carbonifère et injecté, depuis cette époque jusqu'au rhétien, par des venues granitiques métamorphisantes et métallisantes. D'autre part, la stibine forme, dans la série ancienne, de nombreuses veines sans grande continuité ni grande richesse, qui, elles aussi, correspondent à ce que nous sommes habitués à rencontrer dans la chaîne hercynienne de l'Europe centrale, en particulier dans notre Plateau Central.

C'est également dans la série métamorphique que se rencontrent un certain nombre de gisements de fer, rappelant plus ou moins les types scandinaves : amas de magnétite en chapelets dans les micaschistes ou dans les gneiss, à l'Ouest du Tonkin. Sur la rivière Noire, des gîtes de cuivre d'un certain développement en amont de Van-yen sont décrits comme en relation avec des roches vertes éruptives.

Il faut faire, sans doute, une place à part pour une série de filons à remplissage sulfuré complexe, cuivre, plomb, zinc, dont l'âge est au moins post-triasique et doit se rattacher, comme pour la plupart des filons observés dans les massifs hercyniens, à des dislocations connexes des ébranlements tertiaires. Ce genre de gisements se rencontre surtout dans l'Est du Tonkin, quand on se rapproche de la frontière chinoise, et nous allons voir, en passant cette frontière, qu'il se développe vers le Nord-Est en atteignant même le type des gisements mercuriels (inconnu, ou signalé à peine comme traces discutables au Tonkin). Certains gisements de fer de la région de Caobang, en amas dans les calcaires, sont probablement à faire rentrer dans ce groupe, comme les amas d'oxyde de fer pyrénéens.

IX. Sud de la Chine. — Dans toute la partie de la Chine qui confine aux possessions françaises, nous retrouvons les mêmes traits métallogéniques qu'au Tonkin, mais avec accentuation très sensible des types filoniens complexes reliés aux mouvements tertiaires, et développement nouveau des filons mercuriels, dont, jusqu'ici, nous n'avions eu que des traces tout à fait insignifiantes. Cette zone est remarquablement métallisée, et si, pratiquement, les anciennes exploitations chinoises en ont épuisé beaucoup de gisements, du moins, pour une étude théorique, on doit en signaler la grande abondance.

La majeure partie des éléments métallogéniques que nous rencontrons ici semble récente, à l'exception peut-être de l'or, et, dans une certaine mesure, du cuivre. L'étain même est en relation avec des granites qui traversent les sédiments post-triasiques et dont la limite d'âge supérieure

est inconnue. On peut ajouter, à ce propos, que, sauf la réserve précédente pour l'or et pour le cuivre, la distribution des métaux semble obéir à certaines lois générales, qui pourraient laisser supposer une origine unique avec écartement plus ou moins prononcé des fumerolles métallisantes, suivant que le métal en question exigeait, pour garder sa mobilité, une température plus élevée ou une pression plus forte et, par conséquent, des magmas ignés plus profonds. Ce sont des conditions de distribution que nous avons déjà signalées en d'autres pays bien homogènes comme la Toscane, ou, pour la série plus ancienne, le Cornwall, et qui concordent avec notre observation générale sur le rôle prédominant de la profondeur et de la température dans la localisation des métaux¹. Tandis que l'étain se rencontre uniquement dans la zone où les granites apparaissent au voisinage du Tonkin, le cuivre appartient à une zone un peu plus écartée, lié à des roches d'intrusion beaucoup plutôt que d'épanchement proprement dit ; et l'on trouve, en s'éloignant encore davantage, les filons complexes plombo-zincifères, dont le terme le plus aberrant (et, par conséquent, le plus distant des auréoles métamorphisées ou des roches profondes), le plus avancé dans les masses sédimentaires (donc ici le plus oriental), est le mercure. Si cette remarque était exacte, il y aurait ici, entre les divers métaux, entre les divers types de gisements, beaucoup moins une différence d'âge réelle qu'une différence de mise en place dans l'écorce, donnant seulement l'impression d'un âge plus ancien quand le minerai n'a pas atteint les couches les plus superficielles, d'ordinaire les plus récentes. Il faudrait cependant se garder d'exagérer la portée de cette remarque ; car la vraisemblance est pour que des venues métallisantes se soient produites dans la même région, à des époques différentes, lorsque cette région a été, comme celle-ci, l'objet de toute une série de mouvements orogéniques.

Dans le reste de la Chine, les traits essentiels de la tectonique à utiliser par la métallogénie sont surtout la grande ancienneté de l'émersion continentale et l'antiquité parallèle des derniers plissements orogéniques. Ces deux phénomènes ont déterminé, pendant la majeure partie du secondaire et du tertiaire, la formation de sédiments uniquement continentaux qui, restés horizontaux et rarement pénétrés de roches éruptives, ont fort peu de chances pour s'être trouvés minéralisés, sauf dans quelques régions spéciales, voisines des plissements himalayens et birmans, où se sont produites des dislocations tertiaires, accompagnées de montées éruptives, avec fumerolles métallisantes (Sé-tchouan, Kouei-tchéou, Yunnan) que nous venons d'étudier, etc.

X. Japon. — La plupart des gites métallifères du Japon rentrent dans un type assez uniforme et qui est bien celui auquel on pouvait s'attendre d'après la constitution géologique du pays. Les métaux représentés sont, en laissant de côté la pyrite de fer : avant tout, le cuivre ; puis le plomb argentifère, et l'or à l'état de pyrite ou de chalcopyrite aurifères ; accessoirement, dans le Japon méridional, l'antimoine et des traces de mercure. Un seul gisement médiocre d'étain a été signalé dans le Sud de l'île de

¹ Voir page 250.

Kiouchima. En deux mots nous comparerons : le Japon septentrional à l'Ouest américain ou au Mexique, ou, pour prendre un type européen, à certaines parties de la Hongrie ; le Japon méridional (avec Sikok et Kiou-Siou) à la Toscane.

Dans la plupart des cas, on trouve ici, en relation avec les roches éruptives tertiaires, et parfois même avec des andésites du pléistocène, des veines de quartz métallisé, très nombreuses, très ramifiées, souvent enchevêtrées de la manière la plus complexe, qui traversent les roches et sédiments tertiaires et les cinérites ou tufs éruptifs associés, en prenant souvent un développement particulièrement favorable dans ces derniers. Beaucoup de filons présentent cette allure d'une zone imprégnée plutôt que d'une véritable fracture, si habituelle dans des provinces métallogéniques analogues. En même temps, on y observe l'ordinaire disposition bréchiforme des minerais brisés pendant et après la métallisation par la continuation des mouvements orogéniques dont ils étaient un incident. Pratiquement, on a donc souvent des types de stockwerks, de masses minéralisées et, en même temps, silicifiées à teneur assez faible, ou encore de veines étroites, irrégulières, disséminées.

La métallisation comprend, dans une gangue de quartz avec barytine, des sulfures complexes de fer, cuivre, plomb et zinc, avec argent et or. On peut y distinguer deux groupes principaux, qui nous paraissent des cas particuliers d'un même système, pouvant passer de l'un à l'autre sur la longueur d'un même filon, mais qui n'en ont pas moins leur individualité théorique, en même temps qu'ils se différencient dans la pratique industrielle : filons de quartz auro-argentifères genre Comstock ou Schemnitz ; filons de quartz cuprifères genre Montana. Ces derniers renferment très fréquemment des traces sensibles d'argent et d'or, qui les font passer au groupe précédent. L'apparition de gangues manganésifères les rapproche encore plus, dans bien des mines, du type Montana.

5. PROVINCES MÉTALLOGÉNIQUES D'AFRIQUE

L'Afrique se divise en deux groupes principaux : l'un (I), dont les derniers plissements remontent à l'époque carbonifère et que recouvre souvent un manteau horizontal de permo-trias ; l'autre (II), à plissements tertiaires encore saillants.

La grande masse du continent nous offre le type des plates-formes primitives que nous avons déjà trouvé en Scandinavie, en Asie russe, et on y observe peu de filons proprement dits, mais des amas interstratifiés, des imprégnations pyriteuses diffuses dans les schistes, des dépôts de ségrégation ; comme métaux, surtout du fer, du cuivre, de l'or, puis de l'étain avec des granulites, du chrome avec des serpentines, du nickel, du cobalt, relativement peu de plomb et de zinc, à peine des traces de mercure (et encore dans les gîtes, comme ceux de l'Est du Transvaal, qui tendent déjà au type filonien).

Au contraire, dans la zone plissée méditerranéenne, dont l'histoire a toujours été plutôt rattachée à celle de l'Europe qu'à celle de l'Afrique, nous voyons, après une ligne de fracture littorale, manifestée par des

pointements éruptifs tertiaires et des réapparitions de bandes primaires ou triasiques, une série de rides encore saillantes, où tous les terrains jurassiques, crétacés et même tertiaires se montrent bouleversés, disloqués, faillés, avec des crêtes et des ravinements irréguliers, comme peuvent l'être, sur l'autre rive de la Méditerranée, les autres rameaux de la chaîne alpine, Sierra Nevada, Apennins, Alpes Illyriennes. Tandis que la première zone présentait des formations métallifères d'un type profond, ici nous avons, au contraire, des filons du type le plus superficiel (et, par suite, le plus habituel dans les chaînes très récentes, qui n'ont pas encore eu le temps d'être abrasées fortement) : une dispersion extrême, un émiettement, une irrégularité des gites, très nombreux d'ailleurs, qui, malgré quelques belles rencontres, a pu faire comparer les gites algériens à une jolie collection d'échantillons. Comme métaux, absence de l'étain, du nickel, parce que les roches profondes, dont ils dérivent, font elles-mêmes généralement défaut ; des lentilles d'oligiste et des veines de fer chromé uniquement sur une réapparition fortuite des plissements primaires ; au contraire, beaucoup de métaux à caractère essentiellement filonien, c'est-à-dire à combinaisons sulfurées aisément solubles : d'abord du fer et du cuivre, dans une première zone voisine de la traînée éruptive tertiaire, à laquelle nous rattachons tout cet ensemble de filons complexes ; puis, plus loin de la côte, le zinc et le plomb dominant, avec des apparitions fréquentes de mercure : ce métal essentiellement superficiel, rarement cristallisé dans les larges fractures profondes et dont les gisements dessinent, par suite, si bien, sur un planisphère, les lignes de dislocations récentes.

I. Massif ancien. — Dans le massif ancien, la richesse minérale, qui a surtout attiré l'attention jusqu'ici, c'est l'or, et ce sont principalement des gisements aurifères qui vont être mentionnés. Après l'or, vient, par ordre d'importance, le cuivre, sur lequel on a commencé quelques travaux. Le type dominant, ce sont les amas oxydés, les lentilles de sulfures intercalées dans les couches primaires, ou les imprégnations, feuilletés par feuilletés, de terrains schisteux, sous forme de filons-couches. Les fractures filoniennes proprement dites, transversales aux strates et se prolongeant, sur des kilomètres de long, à travers les roches les plus diverses, ne sont pas connues.

Par exemple, dans le *Sénégal*, le *Soudan*, la *Guinée*, le *Fouta-Djalon*, le *pays de Kong*, la *Côte d'Ivoire* et la *Côte d'Or* anglaise, en un mot dans tout ce grand bloc Ouest-africain qui appartient en majeure partie à la France, l'or seul a, jusqu'ici, attiré l'attention. Les rivières aurifères descendant du Fouta-Djalon, soit au Nord vers Bambouk, soit à l'Est vers Bouré, ont, très probablement, pris le précieux métal à des filons-couches, à des veines d'imprégnation, disséminées au milieu de roches cristallophylliennes et de schistes amphiboliques. Dans le pays de Kong et le bassin du Comoé, les placers pourraient bien avoir une origine semblable. Enfin, les gisements de la Côte d'Or, comportent, nous le verrons, deux types principaux : des filons et veines d'imprégnation à Coumassie, des conglomérats primaires à Takwa.

Dans les vastes régions du *Congo* (Congo français et Congo belge),

ce n'est plus de l'or que nous avons à signaler. La région équatoriale tout entière (en y comprenant, à l'Est, l'Est-africain allemand) est, pour une cause encore inconnue, peut-être purement fortuite, presque la seule dans l'Afrique ancienne où l'on n'ait guère rencontré d'or; elle contraste, à cet égard, avec les deux belles zones aurifères qui se trouvent : l'une entre le 5° et le 10° de latitude Nord (Soudan, Côte d'Or, Nubie, Abyssinie); l'autre entre le 15° et le 25° degré Sud (Rhodesia, Angola, Mozambique, Transvaal et Madagascar). Ici, les métaux que l'on a eu à signaler sont, avant tout, le cuivre et le fer, très accessoirement des traces d'étain.

Cuivre et fer se trouvent, là, dans des conditions qui rappellent souvent les gîtes scandinaves, avec cette différence toutefois que certaines de leurs veines se présentent, comme au Niari, intercalées dans des calcaires : d'où résulte nécessairement, au moins à la surface, un facies d'oxydation spécial. Pour le fer, on a trouvé, de divers côtés, des amas d'oxydes cristallins, dont les plus beaux semblent être ceux du Katanga. Pour le cuivre, on a eu surtout l'attention attirée sur deux bassins principaux : celui du Niari, dans le Congo français, et celui du Katanga, à l'extrême Sud du Congo belge.

Au Niari, il existe des gisements d'altération carbonatés et silicatés de cuivre au milieu de calcaires magnésiens, d'âge peut-être dévonien. Si l'on en croit les premières observations, la formation métallifère serait antérieure au Permien, car on ne l'a jamais vue pénétrer dans les grès du Karoo, qui recouvrent en discordance les calcaires en question.

Au Katanga, l'on commence à exploiter en grand des gisements qui, sous leurs formes primitives, semblent des filons-couches éparpillés en veinules dans les schistes siliceux.

Dans la même région, existent divers amas énormes de magnétite et oligiste, des montagnes de fer, qui peuvent, de leur côté, être comparées à celle de la Laponie suédoise ou de la Suède proprement dite.

Le type d'amas pyriteux cuprifères se présente dans le grand district industriel d'Ookiep, en territoire anglais, où l'on observe (à Tweefontein) une association de magnétite et de chalcopryrite (associées avec des norites), qui se présente également dans divers gisements scandinaves, et que l'on retrouve, en Piémont, dans le gîte classique de Traverselle. Le principal de ces amas atteint, à un des niveaux d'exploitation, 11.000 m² de section. En même temps, des lentilles de magnétite et d'oligiste se présentent dans les gneiss et schistes cristallins, par exemple près d'Angra Pequena.

Vers l'Est, au *Transvaal*, nous entrons dans la région classique des mines d'or. Les gisements d'or transvaaliens, qui ont fourni remarquablement peu d'alluvions eu égard à leur étendue, appartiennent à deux types principaux, intercalés, avec des caractères très divers, dans deux formations que l'on est conduit à considérer comme à peu près contemporaines : d'une part, des conglomérats aurifères interstratifiés dans un niveau primaire indéterminé (Silurien ou Dévonien) au Witwatersrand; d'autre part, dans toute la région montagneuse de l'Est, à la limite du haut pays et du pays bas, un type que nous considérons comme le type africain par excellence, celui des filons-couches interstra-

tifiés et disséminés au milieu de schistes métamorphiques (Barborton, Lydenburg, etc.). Il faut ajouter des formations, sans grande valeur pratique, mais intéressantes pour le théoricien, comme les masses de pyrite aurifère remaniées de la série du Black-reef, ou les fissures minéralisées de la série dolomitique. Remarquons, de plus, que le Transvaal renferme, en dehors des gites aurifères, tout un groupe de veines argentifères, plombifères et cobaltifères, rattachées à une série éruptive d'âge intermédiaire entre le primaire et le Karoo, c'est-à-dire à peu près hercynienne, ainsi que des filons d'étain (Swazieland), associés au contraire avec les granites les plus anciens. Par conséquent, l'on doit avoir, au Transvaal, au moins deux venues métallifères très distinctes : l'une calédonienne (or et étain) ; l'autre hercynienne (plomb, zinc, cuivre, argent, cobalt, or, etc.).

A peu près au même étage primaire que les conglomérats célèbres du Witwatersrand, appartiennent les schistes métamorphiques aurifères de Barborton, dont la formation débute, comme celle des conglomérats, par un banc caractéristique de jaspes rouges et rayés à magnétite (non sans analogie avec la série des itabirites au Brésil), que l'on appelle la série d'Hospital Hill.

Dans ces schistes, on observe toute une série de filons-couches, formés de quartz pyriteux et aurifère, qui, tantôt, suivent très exactement les plans de joint des feuilletés, tantôt se dispersent en réseaux ramifiés (comme à la Sheba). Ce type, qui, du Sud au Nord, se retrouve à Steynsdorp, Barborton, Lydenburg, Pilgrimsrest, au Murchison Rango, et que nous allons bientôt rencontrer également dans la Rhodesia, est celui que j'ai désigné plus haut comme le type principal africain ; on l'observe en d'autres régions du monde, dans nombre de massifs anciens, toujours avec les mêmes caractères : ainsi en Scandinavie, en Sibérie, dans les schistes anciens des Alpes, en Guyane, etc.

En même temps que l'or, certains de ces filons-couches renferment de la stibine ; on y a trouvé aussi des minerais de fer et de cuivre, de la crocoïse et même des traces de cinabre. Toutes ces imprégnations, étant postérieures au dépôt des schistes, sont, en même temps, selon toute vraisemblance, postérieures aux conglomérats ; mais on ne sait pas exactement de combien elles sont plus jeunes. La série dolomitique, qui recouvre au Transvaal cette série aurifère, renferme un certain nombre de gisements, dont le type, en raison même de leur intercalation dans la dolomie, est très différent de celui des gisements précédents, encaissés dans les schistes. Mais peut-être l'une et l'autre catégorie de gites appartiennent-elles à une seule et même venue métallifère, différenciée seulement par la nature des terrains rencontrés sur son passage : venue que nous pouvons supposer en relation avec les montées de roches cristallines, dites du Boschveld, dont on a des témoins importants dans le haut de la série primaire, sous la forme de norites avec magnétite et fer chromé, granites rouges, syénites à éléolite, syénites à anorthose, roches porphyroïdes du Zwagershoek, etc. Ces venues se rattacheraient alors à quelques imprégnations métallifères, fer, cobalt, cuivre, or, etc., en relation directe avec ces roches et proviendraient d'une chaîne de plissement, que nous pourrions, par assimilation, qualifier d'hercynienne : chaîne

antérieure au Karoo, qui se serait trouvée assez fortement abrasée pour avoir mis au jour toutes ces roches cristallines de profondeur.

On a, dans cette dolomie, des filons-couches de manganèse aurifère (Barrets-Berlin), d'autres à sulfures complexes de plomb, zinc, fer, cuivre, mercure même, avec fluorine (Kromdraai), puis, au contraire, des fissures minéralisées, verticales, où l'or s'associe avec des sulfures de cuivre (Malmani).

En *Rhodesia*, des gîtes d'or nombreux, mais généralement irréguliers, ont été trouvés, de divers côtés, dans le Matabeleland, le Mashonaland, le Manicaland. Partout, on a des imprégnations quartzieuses et pyriteuses dans des schistes métamorphiques, siliceux ou amphiboliques, souvent au contact ou au voisinage de granites ou de granulites, c'est-à-dire de roches profondes. L'ensemble du pays présente des caractères comparables à ceux de notre Plateau Central, c'est-à-dire des zones de gneiss, mica-schistes, schistes amphiboliques, diorites, granites, etc. Les imprégnations métallifères, suivant une loi générale, que l'on retrouve dans toute l'Afrique ancienne et qui tient à l'allure même des schistes primaires où on les observe, sont, presque partout, interstratifiées, rarement dispersées en rameaux. On peut y trouver, avec la pyrite aurifère, du mispickel, de la galène, de la blende, des minerais cuivreux, parfois de la stibine avec l'or (mine Inez, Gravelotte).

Cette même catégorie de gisements se prolonge, vers l'Est, en passant dans le *Mozambique* portugais.

En face du Mozambique, la partie métallifère de *Madagascar* est un vaste plateau arasé de terrains cristallins et métamorphiques, gneiss, mica-schistes, schistes siliceux, etc., au milieu desquels apparaissent des roches cristallines de profondeur, granites, diorites, etc., et s'intercalent quelques synclinaux primaires.

En général on y trouve surtout des imprégnations aurifères extrêmement disséminées dans les terrains anciens, cristallins ou métamorphiques : imprégnations, au moins en partie contemporaines de la constitution même des gneiss et des quartzites à magnétite où on les observe. Ce sont ces imprégnations, sans grande valeur par elles-mêmes, dont la préparation mécanique naturelle a formé, aux naissances des vallées, de nombreux placers.

Ailleurs, les manifestations éruptives récentes, dont Madagascar porte la trace bien nette, et les cassures, qui, depuis le Jurassique, ont affecté l'île, ont déterminé les filons aurifères d'Andavakoera.

En *Égypte*, il existe, dans les collines de la mer Rouge, entre le Nil et la mer Rouge, des gîtes métallifères, dont les uns paraissent encaissés dans une chaîne primaire avec granites, granulites, diorites, etc., dont les autres se rattachent peut-être aux fractures tertiaires, qui ont produit et accompagné l'effondrement de la mer Rouge.

Les principaux de ces gisements sont des gisements d'or, exploités dans l'Antiquité, soit au voisinage du port de Bérénice, dans l'Étbye, soit au Nord de Kosseir, à Um-Rus, toujours sur la mer Rouge. Dans le dernier cas, on parle de filons de quartz aurifère dans des pegmatites, qui traversent des granites et gneiss : il s'agirait donc, sauf vérification, d'une venue très ancienne, tout au moins d'une venue profonde, où l'or aurait

crystallisé sous pression avec la silice, dans les conditions habituellement réalisées pour les gites d'étain. C'est également à des actions granulitiques sur des micaschistes que l'on rapporte les veines à émeraude du Djebel Sabara (dans la même région), Les gisements de plomb de Safaga, sur la même côte de la mer Rouge, appartiennent peut-être à une formation plus récente ; ils imprègnent des calcaires cristallins, d'âge indéterminé. Enfin, si l'on arrive au Nord, dans le Sinaï, on a certainement affaire à une venue métallifère d'âge crétacé ou tertiaire ; car c'est dans les grès de Nubie que l'on a exploité là, pendant de longs siècles, des veines oxydées de cuivre et de manganèse avec des nids de turquoise. Ce dernier gisement, le seul jusqu'ici dont on puisse certifier qu'il n'appartient pas à une série ancienne, va donc nous servir de transition pour passer à la zone méditerranéenne (Algérie et Tunisie), dont le contraste avec le massif ancien est, ainsi qu'on va en juger bien vite, aussi complet que nous pouvions le désirer pour notre théorie.

II. Zone méditerranéenne (Algérie et Tunisie). — En Algérie comme en Tunisie, si l'on néglige une réapparition de terrains cristallins, dans laquelle on retrouve des lentilles d'oligiste et de magnétite (Mokta el Hadid), analogues à celles du massif ancien dans l'Afrique Centrale, nous observons partout, presque uniquement, des gites filoniens tertiaires, dispersés dans les saillies superficielles d'une chaîne de plissement récente et oxydés sur de grandes profondeurs, par suite de la distance notable à laquelle le niveau hydrostatique se trouve souvent de la superficie dans ces terrains accidentés.

Ces filons, malgré des apparences contraires, tenant, pour la plus grande part, à ce métamorphisme et à cette remise en mouvement superficielle, malgré aussi la prédominance accidentelle de tel ou tel métal dans l'un ou l'autre, me semblent appartenir tous à un seul groupe et s'être formés, dans des conditions analogues, à peu près simultanément. Ce sont, en deux mots, si on les envisage dans leur origine profonde, des filons complexes sulfurés de cuivre, plomb, zinc, fer, antimoine, mercure, etc., probablement dérivés d'une venue éruptive tertiaire, qui forme une zone bien marquée le long du rivage. Nous allons voir ces filons se différencier, aussi bien en théorie qu'en pratique, par l'allure variable de la fracture dans laquelle s'est faite leur incrustation, et nous serons amenés également à envisager une certaine variation méthodique dans la minéralisation, à mesure que l'on s'éloigne de la zone éruptive littorale : le fer et le cuivre commençant par dominer ; puis le zinc et le plomb leur succédant. Mais, auparavant, il est nécessaire de rappeler, en quelques mots, la constitution géologique de ce pays, dont nous allons étudier les gisements.

Si l'on examine, sur une carte d'ensemble, la région Ouest de la Méditerranée, comprenant l'Algérie et le Maroc, on voit aussitôt les diverses bandes de terrains, qui en accusent les plissements, dessiner une courbe continue suivant les rivages de l'Afrique, puis de l'Espagne, en traversant la coupure du détroit de Gibraltar comme si elle n'existait pas. Cela est marqué, notamment : par une ligne de roches éruptives récentes, qui,

presque partout conforme aux rivages actuels, jalonne, suivant leur direction, une fracture probable ; puis, un peu plus loin, par une zone archéenne et primaire, qui se montre, à l'état de tronçons discontinus, à Bône, à Philippeville, en Kabylie, autour d'Alger, à Mouzaïa, Miliana, Oran, la Tafna, au Maroc et à l'Est de Grenade¹ ; enfin, par la série des ondulations jurassiques, crétacées et tertiaires, au milieu desquelles le Trias et peut-être le Permien, ou rarement les schistes primaires, reparaissent à l'état d'îlots. Au Sud, cette zone plissée se termine par des escarpements au-dessus du Sahara.

Il semble, dès lors, y avoir là une chaîne montagneuse, formée par une poussée des terrains vers le Sud, avec une ligne de fracture volcanique en arrière, du côté du Nord ou de la mer : chaîne qui se rapproche, par tous ses caractères généraux, de ce qu'on peut observer dans les autres rameaux alpins, notamment dans la Cordillère Bétique et dans les Apennins, et dont les gisements métallifères doivent, par suite, selon toute vraisemblance, être analogues à ceux de ces régions. Le surgissement de cette chaîne paraît avoir commencé vers l'Éocène, en même temps que les manifestations éruptives, pour se prolonger pendant les périodes suivantes. Son bord externe plissé est au Sud (sa lèvre effondrée étant au Nord), comme il est à l'Est dans les Apennins, ou à l'Ouest dans la Cordillère Bétique. Tout cet ensemble décrit ainsi, autour de la mer Tyrrhénienne, une sorte d'ellipse, dont le centre apparaît comme un immense cirque volcanique, avec une série de cratères adventifs, de manifestations éruptives sur sa périphérie, et une marge ancienne remontée le long de cette fracture, tandis que, tout autour, les terrains, refoulés symétriquement, par la dislocation de cette partie centrale, sont allés se plisser, s'écraser contre une série de butoirs antérieurement consolidés, d'avant-pays plus anciens : la Cordillère Bétique contre la Meseta, l'Atlas contre le Plateau Saharien, de même que les Alpes ont buté contre le Plateau Central ou la Bohême, les Carpathes contre la plate-forme russe, etc.

Ici, comme dans tous les districts métallifères filoniens, il semble que les magmas éruptifs, dont l'apparition au jour est, dans notre cas, par suite de l'érosion peu avancée, à peu près localisée dans la couronne centrale, aient dégagé des fumerolles, immédiatement reprises par les eaux, dans toutes les parois externes de cette ceinture montagneuse, que je comparais tout à l'heure à un grand cratère. Ces dissolutions thermales ont pu s'éloigner d'autant plus des roches éruptives, leur origine première, qu'elles renfermaient des métaux plus aisément solubles dans des conditions de température et de pression voisines des conditions extérieures, et ainsi s'est produite une certaine différenciation des métaux, qui apparaîtrait bien plus complète, bien plus rationnelle, suivant la remarque générale développée dans ce chapitre, si une section verticale de la croûte terrestre nous permettait d'assister à ce départ progressif, de voir l'appauvrissement en principes métalliques se faire peu à peu, à mesure que l'on s'éloigne du magma fondamental.

L'âge des gîtes algériens est, comme on peut le prévoir d'après ces observations, à peu près contemporain de celui des roches éruptives,

¹ Vers l'Est, cette zone se poursuit peut-être en Sardaigne.

qui, elles-mêmes, ont commencé à s'élever pendant l'Éocène. Ce sont des filons tertiaires, qui, suivant le hasard des rencontres, ont pu se trouver encaissés dans les terrains les plus divers, depuis le primaire jusqu'à l'Oligocène ; mais les plus nombreux de ces gites se trouvent, naturellement, dans les terrains qui occupent les plus grandes surfaces en Algérie, c'est-à-dire dans le Crétacé, et les plus importants se sont développés dans ceux de ces terrains qui, par leur structure physique ou leur composition chimique, offraient les conditions les plus favorables à la minéralisation. Il en résulte donc certaines apparences de niveaux métallifères, — d'autant mieux marquées, dans certains cas, que bien des fractures se sont faites parallèlement à la direction générale des plis et restent, par suite, sur leur longueur, dans les mêmes bancs ou au contact des deux mêmes niveaux —. Les filons algériens tirent, par suite, certains de leurs caractères de la prédominance des terrains secondaires, tels que les calcaires, les marnes, les schistes argileux, dans lesquels ils sont habituellement encaissés.

Ce sont, à la fois, des filons superficiels et des filons incrustés, pour la plupart, dans des terrains calcaires ou marneux, alternant avec des schistes. Si l'on ajoute l'irrégularité du relief, d'où résulte la profondeur fréquente du niveau hydrostatique, on a les trois caractères principaux qui déterminent leur facies habituel.

Les deux premières influences ont, l'une comme l'autre, provoqué une grande dispersion, un éparpillement regrettable des gites. Ceux-ci incrustent les fissures de tous genres que peuvent présenter de semblables sédiments plissés : c'est-à-dire que l'on observe, soit des fractures-failles transversales aux couches, soit des fractures de décollement entre deux strates et surtout entre deux terrains inégalement plastiques, comme un calcaire et une argile ou une marne, soit encore des diaclases intérieures des couches : par exemple, de petites fissures perpendiculaires à une grande faille, ou des cassures périphériques dans un dôme qui a éprouvé un mouvement relatif par rapport aux terrains encaissants.

Les actions secondaires sont venues encore compliquer ces phénomènes, et surtout dans les terrains calcaires, où, par le fait même de leur action, se sont constitués quelques-uns des plus beaux gites. En raison de l'irrégularité du relief, qui, dans ces calcaires fissurés, a permis une circulation profonde d'eaux superficielles, constamment renouvelées, leur influence s'est exercée sur de grandes hauteurs, et ainsi ont dû se former les dépôts qui, industriellement, présentent le plus de valeur : pour les blends, les calamines ; pour les pyrites de fer, soit les sidéroses avec hématites dans les calcaires, soit directement les hématites dans les autres terrains ; pour les pyrites de cuivre, les oxydes et carbonates de cuivre, accompagnés, s'il existait un peu d'arsenic ou d'antimoine, par des cuivres gris, etc., etc.

La conséquence, c'est qu'en pratique les gisements algériens peuvent, malgré l'origine commune que je leur attribue ici, présenter des aspects extrêmement variables et rentrant plus ou moins dans les catégories suivantes :

1° Amas de pyrite de fer, avec mince chapeau de fer oxydé et parfois traces de cuivre ; — filons de chalcopryrite, avec un peu d'hématite ou

de sidérose ; — grands amas d'hématite dans les calcaires ou à leur contact, pouvant passer à la sidérose, pouvant aussi s'associer avec des produits cuivreux, ou même des veines de cuivre sulfuré ; — filons de cuivre gris avec hématite, sidérose, carbonates de cuivre et résidu de chalcopyrite, à gangue souvent barytique ;

2° Veines de blende recouvertes d'un mince enduit calaminaire et associées avec plus ou moins de galène ; — amas calaminaires, soit dans les calcaires, soit au contact des calcaires et des marnes : la calamine pouvant être, tantôt rougie par du fer, tantôt chargée de galène, pouvant aussi être associée avec un peu de cinabre, de stibine ou de sénarmonite, et avec des minéraux oxydés du cuivre ; — filons de galène, avec cérusite accessoire, accompagnant des amas calaminaires, etc. ;

3° Oxydes d'antimoine, englobant des parties de stibine intacte, avec parties zincifères, ou plombeuses, etc. ;

Il est facile de voir comment ces trois groupes se ramènent tous à un filon sulfuré complexe de B. G. P. C., où le fer et le cuivre dominant dans le premier cas, le zinc, le plomb et, accessoirement, le mercure dans le second, l'antimoine dans le troisième.

La présence de l'antimoine et du mercure, assez fréquente dans toute une zone située à l'Est de Constantine, entre Batna, Guelma, Duvivier et Bône, sur environ 200 km. de longueur totale, est intéressante à signaler. C'est un fait que nous ne trouvons guère dans les gisements plus anciens et plus profonds. La stibine, que nous observons ici, se présente, notamment dans des conditions tout à fait différentes de celles auxquelles nous sommes habitués dans le tronçon hercynien du Plateau Central français. Là, elle est uniquement associée avec du quartz et, accessoirement, avec de la pyrite ou du mispickel, dans des filons en stockwerk d'âge carbonifère, dont le type rappelle beaucoup plutôt celui des filons d'étain que celui des filons de plomb, et qui se rattachent presque toujours, directement, soit à des microgranulites proprement dites, soit à des granulites passant aux microgranulites.

Parmi les gisements algériens dont nous venons de résumer les conditions de dépôt générales, j'ai déjà dit que les plus voisins de la côte sont surtout ferrugineux et cuivreux, les plus éloignés zincifères ou plombifères, sans qu'il faille chercher une rigueur absolue dans cette remarque¹. C'est, par exemple, dans le premier groupe que se présentent, à la frontière du Maroc, les grands amas d'hématite de la Tafna, datant probablement du Miocène inférieur et substitués à des calcaires liasiques ; puis la série des filons cuivreux sans grande valeur qu'on a essayé autrefois d'exploiter près de Ténès, à Mouzaïa, dans la petite Kabylie, l'amas pyriteux d'El Auzouar, les filons complexes, mais riches en cuivre, de Kef-oum-Theboul, près la Calle, enfin les grands amas d'hématite de Tabarca, en Tunisie, qui seraient depuis longtemps exploités, s'ils ne s'étaient trouvés arsenicaux.

Le second groupe est celui sur lequel ont porté les plus nombreuses recherches dans ces dernières années. Là, se trouvent les mines de

¹ On trouvera ultérieurement des descriptions détaillées de ces zones métallisées algériennes.

plomb de Garrouban, près du Maroc, les amas calaminaires d'Ouarsenis, les filons de blende de Sakamody, les grands gîtes de plomb et zinc du Bou-Thaleb, les exploitations de zinc d'Hammam'n'Bails, la concession d'antimoine du Djebel Taya, l'énorme amas ferrifère du Djebel Ouenza et celui moindre du Djebel bou Kadra (à la frontière tunisienne); enfin les belles mines de zinc et de plomb de Tunisie (amas calaminaires ou veines de galène), du Djebel bou Amar, du Kanguet kef Tout, de Sidi Ahmed, Sidi Youssef, du Djebel Reças, etc.

SECONDE PARTIE

ÉTUDE DES DIVERS ÉLÉMENTS CHIMIQUES

CHAPITRE XIV

HYDROGÈNE, HÉLIUM, AZOTE OXYGÈNE, ETC.

HYDROGÈNE

H. = 1,008

Rôle géologique. — Dès le premier corps étudié par nous, nous nous trouvons en présence d'un de ces éléments qui, par la nature et l'abondance extrême de leurs « minerais », semblent rester en dehors de la richesse minérale, telle qu'on la considère habituellement. C'est une observation, qui ne nous arrêtera plus dans la suite, mais à laquelle il peut être utile de répondre une fois au début de cet ouvrage.

L'hydrogène se présente à nous dans la nature : soit, à l'état d'hydrogène libre extrêmement répandu dans l'atmosphère, mais toujours en quantités très faibles dans ses parties basses qui nous sont seules accessibles¹, soit à l'état de fumerolles volcaniques ayant toujours une tendance à se transformer en eau par la combustion et que l'on a beaucoup de peine à recueillir, soit sous les deux formes essentielles de ses principales combinaisons : les carbures d'hydrogène et l'eau. L'eau est le véritable minerai d'hydrogène, et une grande partie des carbures d'hydrogène que nous utilisons, non pas comme source d'hydrogène, mais comme composés du carbone, ont d'abord emprunté leur hydrogène à cette même origine. Ce « minerai » d'hydrogène, l'eau, se présente avec une abondance ordinaire qui ne l'empêche pas de constituer, en bien des points de la Terre, une véritable richesse, indépendamment même des éléments qu'il peut tenir en dissolution.

C'est la grande raison, pour laquelle on le sépare toujours des richesses minérales proprement dites puisqu'on n'a pas besoin pour lui, plus que

¹ Nous avons signalé plus haut p. 16, l'existence probable d'une haute atmosphère très riche en hydrogène située entre 100 et 200 km. d'altitude.

nous n'en aurons besoin pour l'oxygène et pour l'azote, de chercher des points de concentration anormale. Les points d'exploitation de l'eau comme source d'hydrogène se trouvent ainsi uniquement déterminés par les facilités industrielles de réaliser l'extraction. Si bizarre que la comparaison puisse sembler d'abord, c'est d'ailleurs ce qui se présente à un degré moindre, pour d'autres substances, dont le caractère de richesse minérale n'est pas discuté, et surtout pour les plus banales d'entre elles. En même temps que le fait d'une concentration anormale, les facilités industrielles d'extraction et de traitement séparent seules en réalité ce qui est minéral utilisable et ce qui doit être négligé.

L'eau présente, d'autre part, certaines propriétés chimiques et physiques spéciales, qui ont contribué à lui faire attribuer une place à part, mais dont on a eu tort autrefois d'exagérer l'importance au point de traiter l'eau tout autrement que les autres acides : maximum de densité, solubilité de sels peu fusibles, conductibilité électrique des dissolutions, etc.

Usages¹. — L'hydrogène a pris une certaine importance industrielle avec le développement de l'aviation. Etant six fois plus léger que le gaz d'éclairage, il est employé de préférence, toutes les fois qu'on le peut, pour gonfler les ballons, dont il permet de réduire beaucoup le volume.

Aussi, avec l'emploi des dirigeables en aérostation militaire, a-t-on été amené à organiser des stations de ravitaillement en hydrogène et à faciliter son transport par voies ferrées. On tend également à en développer l'emploi dans le chalumeau oxyhydrique. Pour ces emplois industriels, sa préparation par le procédé ordinaire du zinc et de l'acide sulfurique est tout à fait insuffisante, et l'on s'est efforcé de l'obtenir en grande quantité comme sous-produit industriel.

Actuellement la production la plus économique d'hydrogène est obtenue dans les fabriques de soude électrolytique en Allemagne et en Italie, où la décomposition d'une solution de chlorure de sodium donne de la soude et de l'hydrogène. Une usine applique le même système à la Motte dans l'Oise. On peut également extraire l'hydrogène du gaz à l'eau, soit par traitement à l'air liquide (procédé G. Claude), soit par application d'un absorbant, tel que le carbure de calcium à température modérée.

L'hydrogène gazeux est transporté dans des bouteilles en acier. On a pu également songer à fabriquer de l'hydrogène liquide, mais seulement pour des cas exceptionnels d'hydrogène à emporter par les ballons et non pour le ravitaillement. Celui-ci serait obtenu par compression du gaz à l'eau, avec refroidissement par détente. Ce produit devait être transporté dans des récipients métalliques doubles pouvant contenir un volume de gaz liquide 800 fois supérieur à l'hydrogène gazeux. Il faut alors une manipulation pour passer de l'état liquide à l'état gazeux en introduisant de l'air qui, se liquéfiant, détermine assez de chaleur pour la vaporisation.

On utilise encore le chalumeau à hydrogène avec soufflerie d'air pour la soudure autogène des grands récipients de plomb. On a essayé un

¹ *Liquéfaction de l'air, application à la fabrication industrielle de l'oxygène et de l'azote* (La Nature, 31 mars 1906, n° 1714 et supplément du 29 janvier 1910). Cf. *Ibid.*, 13 mai 1911, n° 1981 et supplément du 17 juin 1911. — Voir également. GUILLET. *L'industrie des métalloïdes* (Gauthier-Villars).

moment l'emploi de l'hydrogène pour l'éclairage par incandescence ; mais il a été remplacé dans cette application par le gaz de houille ou le gaz à l'eau. Enfin, les laboratoires en consument pour obtenir les métaux par réduction de leurs oxydes. On peut également rappeler les propriétés très spéciales de l'hydrogène naissant formé par diverses réactions exothermiques et de l'hydrogène occlus par les métaux.

Le prix de l'hydrogène est, en France, de 1,50 fr. le mètre cube ; en Allemagne et en Italie, de 0,60 fr.

Gisements. — L'hydrogène est, dans la nature, l'élément léger par excellence et l'on peut supposer que, sans cesse, l'hydrogène, dont nous allons voir la production réalisée dans les phénomènes naturels ou industriels et les émanations dégagées par la Terre, tend à gagner les parties hautes de l'atmosphère, ou même à dépasser l'atmosphère grâce à sa grande vitesse moléculaire et à disparaître progressivement pour nous¹. Sa place naturelle est donc, comme nous l'avons dit, dans la périphérie tout à fait extrême de notre planète, et c'est pourquoi nous commençons par lui notre étude métallogénique, malgré son peu de rapport avec les travaux de minéralogie ordinaire. C'est un corps très spécial que l'on a renoncé à rapprocher des métaux comme on l'a fait un moment en chimie et que la géologie conduit, en effet, à en différencier totalement.

Son gisement minéral, qui en contient des réserves indéfinies, est l'eau, dont on l'extrait aisément, soit par électrolyse, soit par action de métaux faciles à oxyder à des températures diverses, soit encore par substitution d'un métal à cet hydrogène dans les acides (fer, zinc, etc.) : ce qui constitue le mode de préparation le plus ordinaire dans les laboratoires.

D'autre part, la Terre dégage constamment de l'hydrogène, soit dans les conditions normales, soit surtout dans les phénomènes volcaniques. Sa présence dans ce dernier cas est souvent masquée par la combustion. Néanmoins, Bunsen a, depuis longtemps, signalé 25 p. 100 d'hydrogène libre dans les fumerolles d'Islande et Fouqué, 16 p. 100 dans celles de Santorin. Il est évident que cet hydrogène résulte là d'une décomposition de la vapeur d'eau. Sa présence profonde, que nous constatons également dans les hydrocarbures et même, exceptionnellement, dans certains fers météoriques, ne contredit donc pas la place assignée plus haut à cet élément dans la série naturelle. On peut admettre qu'entre cet élément périphérique et l'oxygène, il s'est fait autrefois, à haute température et grâce à l'affinité exceptionnelle de ces deux corps, une combinaison stable, que les oxydations détruisent parfois au contact des métaux natifs de la profondeur ou, à la surface, dans certains cas relativement exceptionnels.

C'est même à peu près la seule forme sous laquelle on puisse concevoir la diminution de l'eau à la surface de la Terre : par augmentation de la proportion d'oxygène dans l'écorce silicatée et élimination de l'hydrogène vers les hauteurs de l'atmosphère. Ainsi l'hydrogène, dont la présence est décelée par l'analyse dans notre air, doit être considéré comme ne faisant que le traverser.

¹ Voir plus haut pages 16 et 42. On a fait remarquer également qu'il pouvait y avoir reformation d'eau en vertu de différences de potentiel qui le combineraient à l'oxygène.

HÉLIUM

He = 3,99

L'hélium est un corps trop nouveau et trop rare pour avoir des applications. Il est néanmoins intéressant de marquer sa place dans la série naturelle en raison de son rôle géologique très spécial.

On sait que l'hélium (découvert d'abord dans le Soleil), est produit par la désagrégation du radium, venant lui-même de l'uranium ou du thorium. Etant donné l'importance que semblent avoir les phénomènes radioactifs, la production d'hélium par la Terre peut donc être assez forte. Cet élément se retrouve, en effet, dans un certain nombre de minéraux qui contiennent les autres métaux dont on le suppose émané, l'uranium et le radium, l'yttrium, le thorium, etc.; et tous ces minéraux dégagent de l'hélium quand on les chauffe au rouge. Nous avons précédemment rappelé comment la teneur en hélium de certains minéraux, tels que les zircons, avait pu paraître susceptible de fournir une évaluation en années pour les périodes géologiques¹. Par la même raison, les sources thermales dégagent assez fréquemment de l'hélium, jusqu'à 6 vol. d'hélium pour 100 vol. d'azote à Maizière (Côte-d'Or). Le grisois en contient une proportion qui atteint 13 volumes d'hélium pour 100 volumes d'azote et l'on peut calculer que cette seule cause en déverse dans l'air 10 m³ par jour². Mais ce gaz léger (densité double de l'hydrogène), auquel on n'a encore trouvé aucune affinité chimique, doit nécessairement s'écarter de plus en plus vers la périphérie de notre planète. Il existe dans notre atmosphère, mais en quantités très faibles, avec les autres gaz qui constituent sa famille naturelle (néon, argon, krypton, xénon). En revanche, sa proportion semble notable dans la périphérie du soleil et de diverses autres étoiles³.

AZOTE

Az, ou N = 14,01

A) USAGES, STATISTIQUE ET COMMERCE

Usages divers. — L'azote, avec les autres éléments que nous rapprochons ici de lui dans la série naturelle (hydrogène, carbone, oxygène, puis silicium, soufre, arsenic, chlore, sodium, phosphore, calcium) intervient puissamment dans la vie organisée, pour laquelle on découvrira sans doute ultérieurement le rôle également important d'autres éléments, au milieu desquels cette vie s'est développée en se les assimilant. Les plantes ont besoin d'azote pour vivre, et les animaux, à leur tour, ne peuvent subsister qu'à la condition d'emprunter l'azote aux plantes. C'est de là que provient la principale application industrielle de l'azote, sur laquelle nous allons insister bientôt dans un paragraphe spécial (nitrates et sels d'ammoniaque).

¹ Page 244.² MOUREU et LEPAGE (C. R., 30 oct. 1911).³ 1895. NORMANN LOCKYER (C. R., t. 121, p. 546).

a) En dehors de la fixation spontanée par les plantes, que favorise l'agriculture, constituant ainsi une industrie extractive en quelque sorte inconsciente, nous verrons bientôt que le monde consomme déjà par an plus de 2 000 000 t. de *nitrates minéraux* correspondant, à raison de 15 p. 100 d'azote, à 300 000 t. d'azote. Il nous suffira de mentionner, en outre, ici d'autres emplois de l'azote libre à l'état d'azote, d'acide nitrique, d'ammoniaque, ou de cyanogène, dont quelques-uns également fort importants.

b) A l'état d'azote même, cet élément a été quelquefois utilisé pour effectuer des réactions chimiques en milieu inerte. Mais on emploie surtout ses composés, avec l'oxygène (acide nitrique et nitrates), avec l'hydrogène (ammoniaque), avec le carbone (cyanogène et cyanures).

c) L'*acide nitrique* joue un grand rôle dans les fabriques de produits chimiques et la consommation de cet acide augmente très rapidement dans les grands pays industriels. De 1897 à 1900, le mouvement commercial de l'acide nitrique en France, représenté par des chiffres égaux à l'importation et à l'exportation, a doublé. Les exportations étaient, en 1900, d'environ 1 400 t., comme les importations, et la consommation nationale est en outre, de 5 000 t. Les exportations allemandes ont passé de 774 t. en 1897 à 1 131 t. en 1898.

Cet acide nitrique sert à quatre usages principaux : 1° comme agent d'oxydation dans la fabrication des acides sulfurique, arsénique, oxalique ; 2° comme agent de nitration dans la préparation de l'acide picrique, des composés nitrés (cellulose, nitroglycérine, cellulose, fulminates, poudre sans fumée, mélinite, etc.), ou des couleurs nitrées dérivées du goudron de houille ; 3° comme agent de dérochage dans le travail des métaux, tels que le cuivre et le bronze, dans l'affinage de l'argent et de l'or, dans la gravure sur cuivre et sur zinc ; 4° comme agent de dissolution dans la production des nitrates métalliques. Le développement des industries de l'acide sulfurique, du cellulose et des explosifs, enfin des matières colorantes, qui toutes recourent à l'acide nitrique, a été considérable dans ces dernières années.

Parmi les nitrates ayant un emploi direct, nous rappellerons, outre les nitrates de chaux et de soude utilisés en agriculture, l'usage du nitrate de potasse, ou *salpêtre*, comme oxydant destiné à fournir le moyen de conflagrer rapidement et avec explosion au carbone et au soufre de la poudre, l'intervention analogue de l'azote dans les nitroglycérines, etc.¹. L'azote agit là comme susceptible de fournir avec l'oxygène des combinaisons aptes à se décomposer avec élévation de température violente.

d) L'azote entre encore dans la composition de l'ammoniaque et de ses sels et l'*ammoniaque caustique*, à son tour, a de notables emplois industriels. Elle sert à préparer la soude Solvay, dite à l'ammoniaque, à fabriquer diverses matières colorantes, telles que le carmin de cochenille et l'orseille, à dégraisser les laines, à aviver certaines couleurs, etc.

e) En combinaison avec le carbone, l'azote forme la base des *cyanures* utilisés dans le traitement des minerais d'or, la galvanoplastie, etc.

¹ Les poudres et salpêtres consomment en France 8 à 10 000 tonnes de nitrate paran.

Emploi agricole. — Nous revenons maintenant sur l'application agricole. L'emploi, sous une forme minérale, de l'azote en agriculture est relativement récent et progresse chaque jour. Mais, de tous temps, on a, inconsciemment, fait en agriculture quelque chose d'analogue quand on apportait, sur la terre arable, des fumiers, guanos, etc., ou quand on cultivait certaines plantes particulièrement aptes à fixer directement l'azote de l'air, afin d'utiliser ensuite leurs déchets comme une source d'azote naturelle.

Il est inutile, en effet, de rappeler que, sur toute l'étendue de la Terre, existe, en contact direct avec les plantes qui demandent de l'azote, une mine inépuisable de cette substance indispensable à leur vie, l'air atmosphérique, où la proportion d'azote est de 77 à 79 p. 100. C'est dans cette réserve que la végétation puise spontanément, sous des influences diverses qui ont été très étudiées, et le rôle de l'industrie, en apportant aujourd'hui au sol de l'azote chimique en nitrates ou sels d'ammoniaque, consiste à économiser une partie de ce travail aux plantes et, à activer ainsi leur développement en leur fournissant avec abondance la matière nourrissante déjà assimilable : cette matière ayant été empruntée, par un chemin plus ou moins direct, à la même source unique qui est l'air.

Pour montrer la nécessité de rapporter de l'azote à la terre, Sainte Claire Deville a calculé autrefois la proportion de nitrates qu'emportent chaque année à la mer quelques-uns de nos grands fleuves. Il a trouvé ainsi 238 t. pour la Seine, 193 pour le Rhin, 301 pour le Nil aux basses eaux, etc. On peut, sous une autre forme, calculer que les 24 millions d'hectares de terres françaises en cultures absorbent par an (pour le restituer en partie) 600 000 t. d'azote, correspondant à 4 000 000 t. de nitrate de soude, ou 4 800 000 de nitrate de chaux. Le phénomène étant le même dans tous les pays, si l'azote consommé par la végétation avait une origine minérale, comme le phosphore par exemple, à propos duquel nous aurons à répéter un raisonnement analogue, sa réserve dans le sol serait vite épuisée par la continuité de la vie végétale sur un même terrain. En réalité, les plantes n'ont pas besoin de l'intervention humaine pour se procurer et s'assimiler l'azote de l'air ; elles l'obtiennent, comme nous allons le dire, par l'intervention des nitromonades et des effluves électriques, et, on s'en rend compte aujourd'hui, si la végétation s'épuise sur un sol constamment cultivé de même, c'est moins parce que la nourriture manque que parce que le sol se trouve empoisonné par les toxines résultant de l'activité vitale. Mais cette fixation directe serait insuffisante pour nos cultures intensives. C'est pourquoi la France consomme déjà plus de 350 000 t. de nitrate de soude par an.

Statistique. — La presque totalité des nitrates utilisés est aujourd'hui fournie par les nitrates de soude du Chili, dont la production représente environ 280 000 t. d'azote (2 000 000 t. de nitrate), A côté de ce chiffre, la production de l'azote électrique est encore insignifiante et le sera tout au moins pendant quelques années ; par exemple, les 100 000 t. de nitrate que doit fournir la société norvégienne de l'azote après l'installation complète de ses usines ne correspondent qu'à 13 000 t. d'azote¹. Il

¹ Il semble que, dans les conditions actuelles, l'action du nitrate chilien soit très supérieure à celle du sulfate d'ammoniaque ou de la cyanamide calcique produite

faut ajouter seulement, comme source d'azote d'importance croissante, les ammoniacales dont la houille fournit une réserve minérale.

Nous n'avons donc à insister que sur la *production du Chili*.

C'est en 1821 que Mariano de Rivero fit connaître en Europe le nitrate du Chili, dont le célèbre minéralogiste Haüy détermina les formes cristallines, tandis que Rivero en établissait la composition.

Les exportations de nitrates commencèrent faiblement en 1827. De 1830 à 1834, l'importation du nitrate en Europe fut d'environ 3 000 t. par an, à 65 fr. les 100 kg. (soit 4,20 fr. le kg. d'azote). De 1830 à 1854, on expédia. du port d'Iquique, qui est le centre principal de ce commerce, en tout 370 000 t. (soit, en moyenne, 150 000 t. par an). Depuis ce moment, la consommation a été constamment en croissant et le prix en s'abaissant.

En 1875, le Pérou a expédié 326 870 t., le Chili 100 000 t., et le Rio Loa 50 000 t. : au total 477 000 t.

En 1879, le prix des 100 kg. était tombé à 37 fr. (soit 2,35 fr. le kg. d'azote). De 1883 à 1888, il fut de 25,11 fr. ; en 1890, de 19 fr. ; en 1891, de 22 fr. ; en 1895, de 18,60 ; en 1900, de 20,10.

Les exportations en 1890 atteignaient près de 800 000 t. et la consommation européenne de nitrate de soude était alors de 839 000 t., dont 118 000 pour l'Angleterre et 721 000 pour le reste du continent.

Depuis ce moment, on est arrivé progressivement à dépasser 2 millions de tonnes et la valeur du nitrate était remontée, en 1907, à 28 fr. les 100 kg. Mais, comme le montre le tableau 10, les prix ont de nouveau faibli en 1908 et 1909, en partie faute d'entente entre les très nombreux producteurs, dont le syndicat, ou « combinaison » a été rompu le 31 mars 1909, en partie aussi par suite de la concurrence prévue des nitrates artificiels¹. En 1910, on est descendu un moment au-dessous de 21 fr. ; mais, en oct. 1911, on est remonté à 24 fr.

TABLEAU 10 — PRODUCTION DES NITRATES DU CHILI EN MILLE TONNES

ANNÉES	PRODUCTION mille tonnes.	EXPORTATION mille tonnes.	PRIX MOYEN du délivré. en francs par tonne.
1903	1 463	1 447	22,00
1904	1 534	1 482	25,20
1905	1 733	1 627	25,60
1906	1 799	1 714	27,50
1907	1 814	1 627	28,00
1908	1 946	2 049	24,80
1909	2 108	2 113	24,60
1910-1911	2 400	—	21,00

électriquement. Cette dernière, détruisant le pouvoir germinatif, ne devient un engrais que par une transformation spontanée dans la terre arable, donnant d'abord de l'urée, puis des sels ammoniacaux assimilables.

¹ *Rev. S. Afr.*, 16 janv. 1910, p. 50. Les cours sont cotés en livres par quintal (cwt) de 50,802 kil. Je rappelle, à ce propos, que l'on trouvera à la fin du tome III, la conversion des diverses mesures étrangères en mesures françaises. Les valeurs de nitrates, Lagunas, Lautaro sont l'objet d'une spéculation active à la Bourse de Paris.

Les gisements les plus favorables du Chili commencent d'ailleurs à s'épuiser et l'on considère un demi-siècle comme le maximum possible de leur durée, qui peut être beaucoup moindre.

En 1909, on a consommé, dans le monde, 1 960 000 t. de nitrate de soude, dont 1 485 000 en Europe et le reste aux Etats-Unis; en 1911, 2 340 000 t.

B) PLACE DE L'AZOTE DANS LA SÉRIE GÉOLOGIQUE. — SES GISEMENTS

L'azote n'a, en réalité, qu'un seul gisement originel, qu'une seule place naturelle dans l'univers, c'est l'enveloppe d'air atmosphérique située immédiatement en contact avec l'écorce silicatée : enveloppe, dans laquelle il entre en poids pour les quatre cinquièmes (77 à 79 p. 100) avec tendance à augmenter jusqu'à 40 km. d'altitude environ pour atteindre alors 88 p. 100¹. Il y coexiste avec un autre élément, l'oxygène, dont le poids atomique est très voisin du sien, mais un peu plus élevé : ce qui amène la concentration de l'oxygène dans les parties basses. Il est curieux de constater qu'à un niveau déterminé la proportion des deux gaz dans l'air, sans correspondre à une combinaison définie, affecte cependant un caractère à la fois de constance approximative et de généralité, malgré les phénomènes chimiques incessants, dans lesquels l'un ou l'autre de ces gaz se trouve intervenir. On doit en conclure que cette proportion représente un état d'équilibre momentané entre tous ces phénomènes à allure cyclique : fixation de l'azote par les nitromonades, remise en liberté par les animaux et les microbes anaérobies, combustion de l'oxygène et décomposition de l'acide carbonique par la fonction chlorophyllienne des végétaux, départ périphérique des éléments plus légers, etc. Il est, d'ailleurs, logique de penser que cet équilibre tend à se modifier progressivement suivant une loi à nous inconnue et les conditions primordiales de la vie organisée doivent en être influencées peu à peu. Nous allons commencer par montrer comment les composés azotés divers, observables dans la nature, ont tous, en dernière analyse, l'air pour origine et procèdent de l'azote atmosphérique par un cycle dont l'industrie humaine s'efforce aujourd'hui de reproduire la phase essentielle en l'accélérant. On a, il est vrai, supposé, par une pure conception chimique, que l'azote de l'air pouvait être dû à la décomposition d'azotures internes, comme le carbone proviendrait de carbures. Mais nous ne voyons pas de raisons pour imaginer, sinon à l'état de traces résiduelles, ces azotures internes, dont rien ne nous prouve l'existence, alors que la presque totalité de l'azote observable pour nous se trouve dans l'air ou dans des produits superficiels.

Cherchons, en effet, où se rencontre l'azote dans la nature, indépendamment de l'air. C'est d'abord le monde organisé qui contient de l'azote libre, de l'azote combiné organique et des nitrates (seulement dans les plantes). On a reconnu, depuis longtemps, que les animaux empruntaient leur azote aux plantes ; mais on a eu plus de peine à expliquer comment celles-ci, à leur tour, s'alimentaient en azote au moyen de l'air : cet azote de l'air ne

¹ Par suite de son coefficient de solubilité, l'azote forme 63,59 p. 100 des gaz dissous dans l'eau. Le grisou en renferme 2,5 p. 100.

pouvant leur être assimilable qu'après oxydation. Comment se fait cette oxydation naturelle de l'azote, c'est une question sur laquelle nous devons nous arrêter un instant; car nous aurons bientôt besoin de sa solution pour nous expliquer la formation des gisements de nitrates.

La première méthode d'oxydation est celle qui fait intervenir des effluves électriques. C'est celle que nous allons voir reproduire aujourd'hui artificiellement dans nos usines. Mais la seconde, de beaucoup plus importante, consiste dans l'intervention des microorganismes, découverts en 1889 par Winogradsky, que l'on appelle les *nitromonades*. Ces microorganismes, contrairement à tous les autres, sont incapables de se nourrir de matières organiques, mais, comme les parties vertes des végétaux, empruntent directement leur carbone à une source minérale, l'acide carbonique. Ils vivent dans une liqueur de carbonate de magnésie et fixent l'oxygène à l'état naissant sur l'azote transformé en acide nitrique. Là encore nous trouverons tout à l'heure une méthode industrielle nouvelle fondée sur ce principe. Cette opération naturelle, qui fait passer l'azote nitrique dans la végétation, accumule également, dans d'autres conditions, des nitrates et nitrites partout où il existe de la matière organique en fermentation dans un endroit humide et alcalin sans que les nitrates soient immédiatement éliminés par les eaux. C'est ainsi que l'on explique aujourd'hui la formation des salpêtres, que l'on a si longtemps fabriqués en arrosant avec du fumier des platras, ou des terres meubles contenant de la potasse. C'est de la même manière que se produisent les efflorescences de nitre dans les pays chauds (Bengale, Ceylan, Egypte, etc.), et les sables ammoniacaux de la Cyrénaïque, et c'est peut-être aussi l'origine des nitrates de soude du Chili que nous allons décrire.

L'azote, une fois entré ainsi dans le cycle de la vie, devient à son tour la source des produits ammoniacaux. Les nitrates et sels d'ammoniaque solubles passent dans les eaux, d'où ils aboutissent à la mer, et d'où ils sont accidentellement retournés dans les produits d'évaporation de terrains géologiques pour la plupart récents. Une autre partie de cet azote, accumulée dans les matières organiques qui sont devenues les combustibles minéraux, nous fournit également, par le traitement de la houille, où il existe 1 à 2 p. 100 d'azote, une source industrielle de matières ammoniacales, ou, plus généralement azotées.

En dehors de ce cycle, dont il serait aisé de suivre plus complètement les détails, on peut dire que l'azote n'intervient pour ainsi dire pas dans le monde minéral et, par conséquent, qu'il a uniquement un rôle périphérique autour de notre écorce silicatée sans aucune réserve profonde. Tout au plus peut-on admettre que quelques traces de cette substance se sont trouvées à l'origine emprisonnées dans les roches, dont la refusion contribue aujourd'hui à en exhaler (azote et sels d'ammoniaque) dans les fumerolles volcaniques¹. L'azote constaté dans certains minéraux cristallisés aurait une même cause, ainsi que celui des sources minérales. En tous cas, ces quantités d'azote sont insignifiantes.

¹ Il n'est pas impossible que, suivant l'hypothèse de Moissan et d'Armand Gautier, cet azote des magmas ignés s'y trouve à l'état d'azotures; mais, à notre avis, il y est venu surtout par un retour en profondeur.

Etant donné ces conditions dans lesquelles se présente l'azote, nous avons à étudier, comme industries extractives : 1° l'extraction directe de l'azote de l'air par l'électricité¹ ; 2° la nitrification par emploi accéléré des nitromonades ; 3° les nitrates de soude du Chili.

1° Extraction directe de l'azote de l'air. — Ce problème, après avoir été très longtemps cherché, est entré, depuis 1905, dans une voie véritablement industrielle. Le premier procédé appliqué, très simple dans son principe, consiste à oxyder l'azote par l'arc électrique en étalant celui-ci largement par un aimant. L'application en grand a été d'abord faite, en Norvège, dans les usines de Notodden, au moyen des fours électriques du système Birkeland et Eyde. Après avoir utilisé dans une première usine une chute de 40 000 chevaux à Svaelgfos, puis une autre de 15 000 à Lienfos, on a organisé à Saaheim une autre usine avec 214 000 chevaux. Ces usines, d'un caractère absolument nouveau, puisent tous leurs éléments, comme leur force, dans les produits les plus banals et les plus universellement répandus de la nature : l'eau force motrice ; l'air minéral. Il n'y entre aucune substance minérale et il en sort toute une série de produits : acide nitrique pour les emplois énumérés plus haut et nitrate de chaux, que l'on substitue en agriculture aux nitrates de soude du Chili. Les produits chimiques azotés ainsi obtenus sont nécessairement d'une pureté absolue qui leur donne un avantage commercial, notamment pour la fabrication des explosifs.

Une industrie de ce genre, dont la matière première est à la fois universelle et inépuisable, peut se répandre partout où les ressources en houille blanche et les facilités d'exportation le permettront. Son développement est donc uniquement une question commerciale, et ce côté commercial de la question n'a pas été sans causer des déboires aux usines norvégiennes. A cet égard, quelques chiffres peuvent être utiles.

Actuellement on oxyde, à Notodden, 15 gr. d'azote par cheval-heure et l'on produit 600 kg. d'acide nitrique par kilowatt-an donnant 750 kg. de nitrate. La production de Notodden est de 30 000 t. de nitrate de chaux ; celle de Saaheim d'environ 100 000. Le nitrate de chaux renferme 13 p. 100 d'azote contre 15 à 15,5 p. 100 dans les nitrates de soude du Chili.

On peut encore (procédés Linde et G. Claude), isoler d'abord l'azote pur par liquéfaction de l'air, puis le faire passer sur du carbure de calcium chauffé au rouge. On obtient la cyanamide, qui se décompose par la vapeur d'eau sous pression en donnant de l'ammoniaque. Le défaut de la méthode est que la moindre trace d'oxygène entraînée avec l'azote démolit les appareils².

Un autre système, dû à Ostwald, consiste à appliquer l'action catalytique du platine sur des solutions ammoniacales très diluées, telles qu'en produisent les usines à gaz, les hauts fourneaux, les fours à coke, pour convertir l'ammoniaque en nitrates³.

2° Nitrification intensive par les nitromonades. — La nitrification intensive par les nitromonades est, sous une forme perfectionnée, l'application de la vieille méthode employée jadis pour produire le salpêtre. On s'est rendu compte ' qu'en arrosant, avec une solution de sulfate d'ammoniaque, un support convenable tel que le noir animal, préalablement ensemencé d'organismes nitrifiants, dans des conditions propices d'aérage et de température (30°), on pouvait obtenir une quantité de salpêtre correspondant à 5 ou 6 000 t. par an et par hectare, avec une couche de noir en grains de 2 m. de haut, percée par des cheminées d'aérage. Ce salpêtre avait l'inconvénient d'être dilué et de nécessiter une très forte évaporation.

Dans des conditions plus analogues à celles des anciennes nitrières, les mêmes savants ont alors opéré sur des terreaux maintenus dans un état d'humidité constante entre 15° et 22° et fréquemment remués pour simuler le labour. On a eu, de cette façon, avec une couche de 0,50 m. d'épaisseur, 1 200 t. de salpêtre par an et par hectare : cela sous forme d'une dissolution assez concentrée pour que les frais d'évaporation soient très faibles. Cette méthode n'est évidemment pas de nature à concurrencer les autres grandes industries décrites ici ; mais, outre son intérêt scientifique, elle peut permettre de se procurer du salpêtre pour la poudre dans certains cas particuliers.

3° GISEMENTS DE NITRATE DE SOUDE AU CHILI¹

Situation. — La région à nitrates du Chili est située entre la grande Cordillère des Andes et la Cordillère de la Côte, dans une zone qui, au Sud du Chili, forme la Pampa riche et cultivée, mais qui, en arrivant vers le Pérou, à l'Ouest de la Bolivie, dans le désert d'Atacama et la Pampa de Tamarugal, prend un caractère désertique. On la trouve entre le 18° et le 26° de latitude, sur un vaste plateau situé entre 1 000 et 1 600 m. d'altitude. Ce pays, qui appartenait jadis au Pérou, a été, en 1880, l'occasion d'une guerre, à la suite de laquelle il a été conquis par le Chili.

Il est desservi, du Nord au Sud, par les ports de Arica, Pisagua, Iquique (région de Tarapaca), Patillos, Tocopilla, Mejillones, Antofagasta et Taltal (désert d'Atacama), dont chacun forme l'aboutissement d'une voie ferrée, mais surtout par les ports d'Iquique et d'Antofagasta, où se fait la grande exportation des nitrates (fig. 15 et 467). Une seule de ces lignes, celle d'Antofagasta, après avoir traversé la région des nitrières, s'élève vers les hauts plateaux boliviens (Huanchaca, Oruro, etc.) La région de Tarapaca (Lagunas, etc.) est la plus importante.

Les conditions toutes spéciales du climat où, pendant quatre à cinq ans,

¹ 1905. MUNTZ et LAINÉ. (C. R., 27 nov.).

² 1877. GORMAZ. *Salpêtres et guanos du désert d'Atacama.* — 1878. WEISS. *Ueber Salpeter und Guano in der Wüste Atakama* (Sitz. Ber. der Nat. Ges. Isis, p. 13, Dresde). — 1885. MUNTZ et MARCANO. *Formation des terres nitrées dans les régions tropicales* (C. R., 6 juillet). — 1885. BERTHELOT. *La fixation de l'azote atmosphérique* (R. Sc.). — 1906. ORTUZAR. *Le Chili de nos jours*, 1 vol. in-8°, p. 397 à 411. — 1910. MAX WEITZ. *Le nitrate de soude, sa prov., son extr. et sa fabr.* (Anvers, album in-4° avec 59 vues phototypiques). — 1910. L. DE LAUNAY. *Les Nitrates du Chili* (La Nature, n° 1944, 27 août). — 1910. SEMPER et MICHELS, *L'industrie des nitrates au Chili.*

il ne tombe souvent pas une goutte de pluie, ont déterminé la formation d'une série de bassins d'évaporation, désignés, suivant les cas, sous le nom de *salares* et de *nitrières*, dans lesquels on trouve, comme nous allons le voir, des matières salines diverses, formant des croûtes durcies que l'on est obligé de faire sauter à la mine.

Origine. — L'origine de ces gisements a été très discutée. On y a vu une ancienne plage soulevée lors du plissement des Andes : plage, sur laquelle se seraient décomposées des accumulations de plantes marines. Cette théorie, qui est celle de C. Nöllner (1868), se fonde surtout sur la fréquence de l'iode et, au contraire, sur l'absence du phosphore dans les gisements de nitrates. On en a conclu que ces nitrates venaient forcément de plantes et non pas de dépôts de guano, auxquels on a également songé¹. A. Gautier a fait remarquer à ce propos que des oiseaux de mer, nourris d'algues et de mollusques marins, avaient des guanos chargés d'iode. Pissis avait, d'autre part, invoqué des actions d'effluves électriques pour expliquer un emprunt direct de l'azote nitrique à l'atmosphère.

La théorie de la plage soulevée a le très grand défaut qu'elle ne repose sur aucun fait géologique. Les sels minéraux reposent, comme nous allons le voir, sans autre interposition qu'un peu d'argile, sur un fond de roches primitives. Rien absolument n'indique à notre connaissance un dépôt marin, dont l'âge devrait être presque contemporain et rien, dans la zone de 75 km. qui sépare les nitrates de la mer, ne confirme non plus cette idée. On pourrait plutôt songer, soit à un dépôt de guano, soit à l'assèchement d'une dépression marécageuse intérieure ayant été autrefois le théâtre d'une abondante végétation et devenue désertique par la transformation du climat. Quant à l'origine de la soude combinée avec ce nitre, elle est évidemment dans les roches du sous-sol.

Principaux gisements. — Les principales salpêtrières sont, du Nord au Sud, la région du *Río Loa*, le bassin de *Caracoles* et les salares de Carmen et de Navidad communiquant avec le Pacifique par l'étroite gorge de Megra, près Antofagasta ; *Aguas Blancas*, entre les deux ports d'Antofagasta et Blanco Encalada ; *Punta Negra* (avec Galleja) ; *Cachiyugal* en face le port de Taltal ; *Baron*, etc...

A *Cachiyugal*, la longueur connue du gîte est de 8 km. environ, la largeur d'une centaine de mètres, l'épaisseur rarement d'un mètre. La teneur moyenne en nitrate de soude ne dépasse pas 25 p. 100.

A *Punta-Negra*, la longueur est de 12 km., l'épaisseur moyenne de 1 m., la teneur de 30 à 40 p. 100.

Enfin le gîte d'*Aguas Blancas* a plus de 30 km. de long, une puissance de 0,1 à 0,6 m. et une teneur de 26 p. 100.

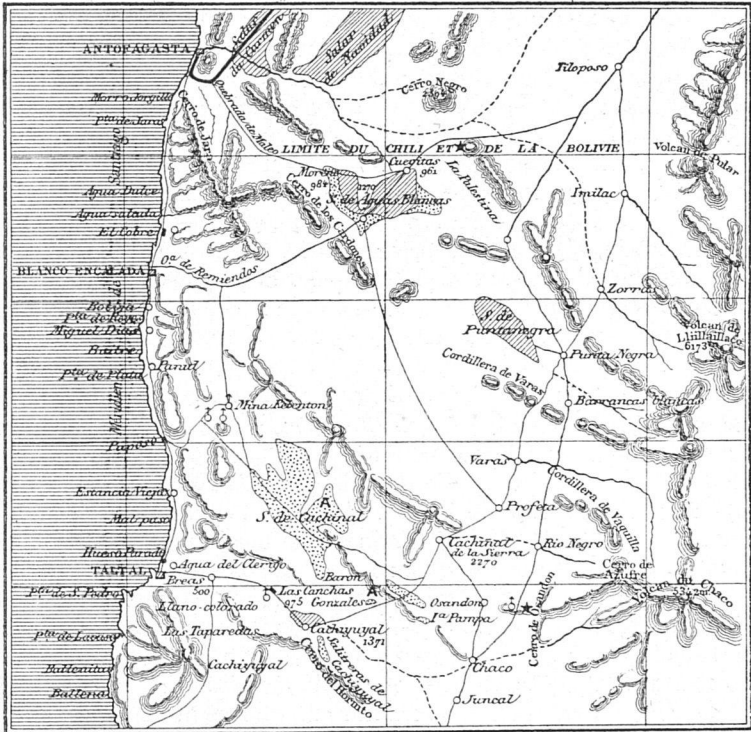
Parmi les Sociétés les plus connues, le *Lautaro Nitrate*², constitué en 1889, a quatre usines de raffinage, dont la principale est l'officina Ballena et pourrait aisément produire 150 000 t., si les conditions du marché ne le forçaient pas à se restreindre à 80.000 t.

¹ 1894. A. GAUTIER. *Sur un gisement de phosphates de chaux et d'alumine* (Ann. d. m., 9^e, t. 5, p. 51). — Les guanos des îles Chinchas sont assez sensiblement plus au Nord par 14° de latitude.

² Lautaro : Société au capital de 13.750.000 francs.

Exploitation. — La mise en exploitation de ces richesses a présenté, par suite des conditions climatiques, des difficultés très grandes, dont la première était l'impossibilité de trouver de l'eau potable.

On ne rencontre l'eau qu'à l'état de nappes souterraines dans les grandes vallées qui descendent des Andes et on l'extrait alors par des puits au moyen de manèges à mulets. A la surface, c'est tout au plus si,



- Dépôts de sel (Salar).
 Dépôts de salpêtre (Salitre)
- A Guano.
 B Borates de chaux et soude
 * Mines d'argent.
- † Mines de cuivre.
 — Établissements.
 o Eau douce.

Fig. 15. — Carte des gisements de nitrates du district d'Atacama.

en hiver (de juin à septembre), il coule un peu d'eau, généralement tellement chargée de principes salins qu'on ne peut l'utiliser que pour l'alimentation des machines en se servant de condensateurs à air adoptés presque partout dans le pays.

En outre, une compagnie qui s'installe est obligée de tout fournir à ses ouvriers, au moins dans les premiers temps : eau, nourriture, vêtements, etc. Aussi a-t-on souvent fait remarquer le contraste entre ce désert et la fertilité répandue sur des pays entiers par les matières que l'on en extrait.

Pratiquement, on ne considère comme exploitables que les gisements tenant au moins 17 p. 100 de nitrate brut dans la couche à nitrates, dite

*caliche*¹. Tout ce qui est au-dessous de cette teneur est laissé de côté. C'est là évidemment une limite destinée à s'abaisser si, avant l'épuisement complet des nitrates riches, l'extraction directe de l'azote de l'air n'est pas devenue assez économique pour ruiner cette industrie.

Dans une nitière ordinaire, les couches que l'on trouve de haut en bas sont les suivantes. A la surface, on rencontre d'abord une couche de sable avec fragments de gypse, dite *chuca*. Au-dessous vient une sorte de conglomérat de graviers à peine roulés (*costra*), avec ciment de sulfates divers et de chlorure de sodium. Des efflorescences salpêtrées y annoncent déjà souvent la présence du nitre, qui tend à dominer vers la base : d'abord dans le *congelado*, qui ressemble à de la terre gelée ; puis surtout dans la *caliche*, qui est le minerai exploité. L'épaisseur recouvrant la caliche est ainsi de 1 à 3 m. Cette caliche, dont la couleur varie du gris sale au blanc, peut contenir au maximum 50 p. 100 de nitrate de soude : le reste étant formé de chlorure de sodium, sulfates de potasse, soude et chaux, sels de magnésie, nitrate de potasse, iodate de potasse et borates. Cette caliche peut avoir 0,20 à 2 m d'épaisseur. Elle repose sur une couche d'argile (*coba*), sous laquelle vient le fond de roches primitives.

Il est, en outre, arrivé qu'une remise en mouvement des nitrates les ait dissous et transportés dans un nouveau bassin, où ils ont recristallisé dans des conditions un peu différentes (Salar del Carmen, près Antofagasta).

Pour exploiter les nitrates n'affleurant pas, on commence par forer des trous de sonde jusqu'à la *coba*, située à la base de la caliche. On fait alors sauter avec une poudre lente, fabriquée dans les usines à nitrates elles-mêmes, afin d'ouvrir le terrain sur une étendue aussi grande que possible. On enlève ensuite le terrain supérieur, on extrait la caliche et on la transporte aux usines (*officinas*), où elle est concassée, puis traitée dans des chaudières de dissolution afin d'extraire, par des cristallisations répétées, le nitrate à l'exclusion des autres sels nuisibles. La solution chaude s'écoule par des canaux dans des étangs de cristallisation ; puis les eaux mères en sont extraites et employées encore à la fabrication de l'iode, pour lequel elles ont aujourd'hui presque un monopole.

Le produit marchand est un nitrate gris, tenant 95 p. 100 de nitrate de soude, 2 p. 100 de chlorure de sodium, 0,6 de sulfate et 2,3 d'humidité. On peut encore obtenir un nitrate blanc pur à 96 p. 100, dit nitrate raffiné.

OXYGÈNE ET OZONE

$$O = 16 \quad - \quad O^3 = 48.$$

Usages. — L'oxygène commence à jouer un grand rôle industriel. On l'emploie surtout pour obtenir de hautes températures avec de l'air enrichi en oxygène. Il sert à alimenter le chalumeau à hydrogène ou à gaz d'éclairage, pour la fusion du platine et pour la production de la lumière Drummond par incandescence de la chaux, de la magnésie ou de la zirconie. On l'utilise également de plus en plus dans la soudure autogène

¹ Vers 1885, on exigeait même 20 p. 100.

ou pour le chalumeau coupeur¹. On a proposé de l'employer dans la fabrication du verre pour accélérer la fusion par des injections d'oxygène dans le verre pâteux, dans la purification du gaz de houille, dans la conservation des matières alimentaires, dans le blanchiment du papier et même dans la fusion directe de l'or associé au quartz. Enfin, la thérapeutique en fait usage sous forme d'inhalations et consomme ainsi environ un dixième de la production.

L'oxygène, destiné à ces diverses applications, se trouve aujourd'hui couramment dans le commerce, comprimé dans des bouteilles en fer forgé de 830 litres à raison de 10 fr. le m³. Quatre usines françaises le fabriquent à Montbard, Toulouse, Clichy et Boulogne-sur-Seine.

On peut rattacher aux emplois de l'oxygène ceux de l'*ozone*, qui sont également nombreux. L'ozone, employé généralement sous forme d'air ozonisé à 1 p. 100, sert pour produire des oxydations régulières et rapides dans la fabrication de l'acide acétique par l'alcool, de la vaniline, dans le traitement du whisky, dans le blanchiment de la cire, de l'amidon, de l'ivoire, dans la préparation des huiles siccatives et du linoléum, dans le vieillissement artificiel des vins, ou dans celui des bois destinés aux instruments de musique. Comme antiseptique, il est utilisé pour la conservation des aliments, pour le nettoyage des tonneaux moisis, pour la stérilisation des eaux destinées à l'alimentation publique et ce dernier emploi tend à prendre, avec la difficulté croissante d'obtenir de l'eau de source non contaminée, une importance considérable.

L'*eau oxygénée* peut également être citée à ce propos. C'est l'agent de blanchiment type, d'abord employé par Dumas pour la restauration des tableaux (1830), puis pour le blanchiment des plumes (1880) et aujourd'hui de plus en plus généralisé (étoffes et textiles, or, ivoire, corne, paille, canne, bois, gélatine, huile, sucre, etc.)². On s'en sert également pour la teinture des cheveux et, en médecine, pour les traitements antiseptiques.

Fabrication de l'oxygène. — Très nombreux sont les procédés destinés à produire l'oxygène : électrolyse de l'eau et distillation fractionnée de l'air liquide³, qui sont les deux procédés principaux ; puis réduction de certains peroxydes, comme les bioxydes de baryum ou de plomb ; décomposition du chlorate de potasse ou de l'eau oxygénée (laboratoires), etc. Son prix, qui était de 12 fr. le m³, est descendu à 9 ou 10. Sa production, en France, est de 30 000 m³ (mesurés à 760).

Fabrication de l'ozone. — L'ozone est obtenu, soit en partant de l'oxygène ordinaire, généralement par l'action de l'énergie électrique (appareils Marmier, Abraham et Otto, etc.), soit, au laboratoire, en partant de composés oxygénés, capables de dégager de l'oxygène.

¹ Voir *La Nature*, 1^{er} janv. 1910.

² GUILLET. *L'industrie des métalloïdes* (Gauthier-Villars, p. 120).

³ Dans la méthode de liquéfaction partielle, on amène de l'air comprimé et froid dans des tuyaux enveloppés par de l'oxygène liquide en voie d'évaporation. Pendant son ascension, l'air se liquéfie et le liquide qui retombe agit alors sur l'air qui monte, en condensant peu à peu l'oxygène moins volatil et vaporisant l'azote, de telle sorte que, finalement, on recueille l'azote en haut et l'oxygène en bas (*La Nature*, n° 1699).

Fabrication de l'eau oxygénée. — La fabrication de l'eau oxygénée passe toujours par l'intermédiaire du bioxyde de baryum, qui sert également dans certains procédés de fabrication de l'oxygène. Ce bioxyde est, comme nous le verrons, obtenu en Angleterre en partant du carbonate. L'Angleterre en importe en France environ 240 t. par an, auxquelles il faut ajouter 70 t. venant d'Allemagne. La France fabrique environ 6 000 t. d'eau oxygénée.

Gisements d'oxygène. — La nature contient des réserves indéfinies d'oxygène et cet élément peut être considéré comme caractéristique de la zone dans laquelle s'est développée la vie, à laquelle sa présence est nécessaire.

Il entre pour un cinquième environ dans la composition de l'air. Il est surtout extrêmement abondant dans les mers, dont il constitue 85,80 p. 100 et dans l'écorce terrestre, dont, à lui seul, il forme 47 p. 100. Si l'on envisage l'ensemble de tout ce qui peut nous être directement abordable dans l'univers, air, mers et écorce jusqu'à quelques kilomètres de profondeur, l'oxygène y entre exactement pour moitié.

Par contre, toutes les indications que nous pouvons avoir sur les parties profondes de notre planète tendent à nous les faire envisager comme dépourvues d'oxygène. Cela est particulièrement net pour les filons métallifères, dont l'immense majorité ne se charge en oxygène que par un phénomène d'altération superficielle, tandis qu'en s'y enfonçant, on ne rencontre (sauf dans le cas de métaux extrêmement oxydables et susceptibles d'emprunter leur oxygène à la dissociation de l'eau) que des métaux à l'état réduit. On peut donc considérer que la zone de notre planète abordable à nos observations s'est formée par combinaison de l'oxygène : d'un côté, avec les éléments de la zone plus excentrique, où se trouvait l'hydrogène (et peut-être le carbone) et, de l'autre, avec la zone inférieure, constituée par le silicium, l'aluminium, le sodium et le magnésium¹. D'où la superposition actuelle de l'écorce silicatée, de l'eau et de l'air. Tout le reste des éléments chimiques ne constitue, nous l'avons vu, dans cette écorce, qu'une partie infime et d'origine adventive.

Pour un corps aussi abondant, aussi uniformément disséminé, la question d'extraction se réduit, faute de concentrations anormales possibles, à un simple problème industriel, où l'on puise, comme nous l'avons vu, dans les deux mines inépuisables de l'atmosphère et de l'eau.

¹ PHIPSON (C. R., 1893, t. 117; 1895, t. 121) a soutenu cette thèse que l'oxygène augmenterait peu à peu par la vie végétale et n'aurait pas préexisté dans l'atmosphère. On peut, en effet, concevoir qu'avant le développement des végétaux primitifs une partie de l'oxygène, aujourd'hui libre, s'était combinée avec le carbone; mais, par contre, il a dû exister, à l'état libre, de l'oxygène qui a servi plus tard aux oxydations des métaux internes. Il paraît donc impossible de savoir par cette voie si la proportion d'oxygène dans l'air a augmenté ou diminué. En tout cas, cela ne contredit pas la position extérieure que nous attribuons à l'oxygène dans la série primitive naturelle.

CHAPITRE XV

FAMILLE DU FLUOR

FLUOR, CHLORE, BROME, IODE

Fl = 19 — Cl = 35,46 — Br = 79,92 — I = 126,92.

Caractères généraux de la famille du fluor. — Chimiquement, le fluor, le chlore, le brome et l'iode constituent une famille naturelle remarquablement homogène, depuis longtemps connue et commune à toutes les classifications chimiques. Leur facilité de combinaison avec l'hydrogène est particulièrement caractéristique, ainsi que la façon dont ils décomposent tous l'eau à la température ordinaire.

Géologiquement, leur rôle, tout en présentant d'assez nombreuses analogies de l'un à l'autre, accuse des différences en rapport avec l'intensité variable de leur activité chimique, qui va, on le sait, en décroissant à mesure que leur poids atomique augmente. Le fluor est le minéralisateur par excellence, comme il est le corps le plus actif de la chimie, et nous allons le voir jouer un grand rôle dans les phénomènes de fumerolles, de filons ou de cristallisations minérales. Il en est encore de même pour le chlore. On n'aperçoit guère, au contraire, dans ce sens, l'intervention du brome et surtout de l'iode ; les bromures et les iodures d'argent, que l'on peut rencontrer dans les filons, paraissent y avoir été introduits par en haut, dans l'altération superficielle.

D'autre part, la facilité de combinaison de tous ces halogènes avec les métaux alcalins et alcalino-terreux et la solubilité ordinaire des sels qui en résultent, ont tout naturellement amené la concentration progressive de ces sels dans les eaux de la mer, ou dans leurs produits d'évaporation. Cette concentration dans les eaux est très marquée pour les iodures et bromures, qui existent presque uniquement à l'état de solutions, leurs sels étant pour la plupart déliquescents et, par suite, appelés à se redissoudre rapidement. Elle est moins accentuée pour le chlore, dont les sels ont pu souvent subsister dans les terrains géologiques, là où une évaporation les avait précipités, et même dans les roches cristallines, qui en contiennent fréquemment encore des traces. Enfin, pour le fluor, ce sont les minéraux cristallisés qui l'emportent sur les dissolutions ou sur les produits d'évaporation, bien que la fluorine ait souvent éprouvé des remises en mouvement dont il sera bientôt question à l'occasion des sédiments et bien que

l'on trouve du fluor dans certaines eaux minérales ¹ ayant circulé souterrainement au contact de roches cristallines.

Enfin, comme tous les éléments donnant des sels solubles, les métalloïdes de la famille du fluor se sont introduits dans l'activité organique, pour laquelle ils se sont naturellement trouvés constituer des éléments indispensables. C'est des végétaux et spécialement des végétaux marins que l'on a extrait longtemps exclusivement l'iode et le brome, aujourd'hui produits de préférence par des gisements minéraux.

On connaît également l'importance du chlore, sous la forme de chlorure de sodium, dans la circulation sanguine et les résultats obtenus en introduisant dans l'organisme un sérum d'eau de mer avec tous ses chlorures, bromures, iodures, etc. Le fluor même n'est pas étranger à la vie : il existe dans les os des animaux vivants et sa proportion s'y accroît peu à peu dans la fossilisation pour rapprocher le phosphate de chaux de la composition des apatites cristallines. On en retrouve dans l'émail des dents, dans le cerveau, dans le sang, dans le lait, etc.

Si l'on cherche la place de ces éléments dans la série naturelle, on est d'abord frappé de leur abondance toute spéciale dans les eaux de la mer. C'est là, en effet, que va aboutir tout ce que les roches, les fumerolles, les filons et les sédiments ont, à un moment quelconque, renfermé de leurs composés. Mais le point de départ initial de ces éléments est-il bien dans la mer ? Il faudrait, pour le soutenir, admettre que les inclusions chlorurées des roches profondes et les fumerolles volcaniques, où les chlorures abondent, sont uniquement le retour au jour d'infiltrations marines. Cette idée, bien que soutenable, se heurte à de nombreuses objections. A plus forte raison quand il s'agit du fluor, dont le rôle dans les cristallisations pétrographiques est si incontestable. Nous croyons donc plutôt, comme nous avons déjà eu l'occasion de le dire ², à une origine première inférieure à la scorie silicatée superficielle. Mais, pour de tels éléments plus que pour tous les autres, les remises en mouvement réitérées, et les cycles de redissolution et recristallisation, qui en ont été la conséquence, tiennent une place que nous mettrons bientôt en lumière dans chaque cas particulier.

FLUOR

Usages. — Le fluor n'a été isolé par Moissan qu'en 1886 par l'électrolyse du fluorure de potassium mélangé à l'acide fluorhydrique anhydre, et, en 1900 seulement, Poulenc et Meslans ont construit un appareil susceptible de le fabriquer industriellement. On a songé à utiliser le fait que son action sur l'eau donne de l'ozone, et non de l'oxygène, pour préparer couramment l'ozone. Ses propriétés oxydantes lui assureraient d'autres emplois si son prix n'était pas aussi élevé.

Parmi ses composés, l'acide fluorhydrique est employé depuis longtemps pour la gravure sur verre. On utilise ses propriétés antiseptiques pour combattre, en distillerie, certaines fermentations, notamment les

¹ Comptes Rendus Ac. Sc., 28 janv. 1907.

² Pages 21 et 43.

fermentations lactique et butyrique. Il sert à la fabrication de l'acide hydrofluosilicique et des fluosilicates. Parmi les usages de ce dernier acide, rappelons l'analyse microlithique des roches (procédé Boricky).

On a encore employé l'acide fluorhydrique dans les travaux de forage pour la recherche du pétrole ou des gaz naturels¹.

Emplois et sources de la fluorine. — Des deux minéraux principaux qui contiennent le fluor et qui ont eux-mêmes quelques usages, la fluorine et la cryolite, le plus important de beaucoup est le premier.

La *fluorine* (fluorure de calcium, CaF_2) outre qu'elle est la source ordinaire de tous les composés du fluor, sert dans la métallurgie du fer et de l'aluminium.

Dans la métallurgie du fer et de l'acier, la fluorine a l'avantage de donner une grande fluidité et de permettre ainsi une économie de combustible. Jusqu'au XIX^e siècle, on la considérait même comme un fondant presque nécessaire. L'emploi de l'air soufflé a permis ensuite de lui substituer la chaux plus économique ; mais on revient parfois à la fluorine, notamment dans le procédé basique, pour obtenir un meilleur rendement. La fluorine destinée à cet usage ne doit pas contenir plus de 3 à 4 p. 100 de silice. Par le moyen de la fluorine, on a pu obtenir un ferrosilicium à 10 p. 100 de silice en chargeant des mines siliceuses dans un fourneau soufflé ordinaire.

Quand on s'en sert pour l'aluminium, il faut également que la fluorine soit très exempte de silice et très blanche : conditions toutes deux difficiles à remplir. La silice a l'inconvénient de passer dans l'acide fluorhydrique et, de là, dans l'aluminium.

La fluorine, quand on la trouve en masses un peu volumineuses, est, en outre, parfois taillée comme pierre d'ornement. On prétend même que ce dernier usage remonte à l'antiquité et que les vases murrhins de Pline étaient des vases de fluorine, dont on a retrouvé deux spécimens à Pompéi.

On a proposé également la fluorine pour la fabrication du verre opale.

Les verreries consomment environ 10 à 15 p. 100 de la production de fluorine.

Enfin, on en emploie un peu comme liant dans les manufactures de meules d'émeri.

En raison de ces divers usages, et surtout de l'emploi croissant de la fluorine en métallurgie, l'extraction de cette petite substance s'est beaucoup accrue dans ces dernières années. Les deux plus forts producteurs sont les Etat-Unis, où l'on extrait de 30 à 40 000 t. par an depuis 1902 (42 000 t. en 1909) et l'Angleterre, où la production, qui était à peine de 4 à 500 t. entre 1880 et 1900, a pris à ce moment un brusque essor jusqu'à 50 000 t. en 1907, pour retomber à 35 000 en 1908. Viennent ensuite l'Allemagne avec 14 500 t. en 1909 et la France avec 5 500 en 1908. Le prix moyen varie de 20 fr. pour le sable de fluorine lavé à 50 fr. pour les beaux morceaux et peut atteindre des chiffres infiniment plus élevés, jusqu'à plusieurs milliers de francs, quand la fluorine est en masses assez grandes pour y tailler des objets importants.

¹ 1896. STAHL. (*Z. f. ang. Ch.*, p. 225.) — L'acide fluorhydrique vaut 2,25 fr. le kg. ; l'acide fluosilicique 30^e, 1 fr.

Emplois et sources de la cryolite. — La cryolite ($6\text{NaFl} + \text{Al}^2\text{Fl}^6$) a été employée longtemps dans la métallurgie de l'aluminium par électrolyse, où elle constitue le bain de fusion dans lequel on dissout la bauxite. Il faut, pour cela, la débarrasser soigneusement de la sidérose qui l'accompagne. On la remplace de plus en plus, en ce cas, par de la cryolite artificielle obtenue en partant de la fluorine: cryolite qui contient toujours un peu de sulfate de chaux. La cryolite sert également dans l'industrie des sels de soude et dans certains verres et porcelaines. L'emploi pour les sels de soude est de beaucoup le plus important. Le Groenland, qui a le monopole commercial de cette substance, en exporte, par an environ 1 200 à 1 500 t. aux Etats-Unis, où leur valeur est de 75 à 100 fr. la tonne. Vers 1898 à 1903, cette importation allait de 5 à 7 000 t. A Paris, la cryolite vaut au détail 1,50 fr. le kg.

Minerais du fluor. — Le principal minerai de fluor est le fluorure de calcium, ou *fluorine*, que nous allons étudier spécialement. La fluorine, comme l'a montré Moissan, renferme parfois un peu de fluor libre, qui se décele par un dégagement d'ozone quand on la pulvérise. Elle doit ses teintes variées, tantôt à du manganèse ou à du fer, tantôt aussi à du carbure d'hydrogène. Sa propriété d'être fluorescente tient aux terres rares, notamment au gadolinium, qui existent constamment en traces¹. Nous avons également signalé, comme source de fluor, la *cryolite*.

On peut mentionner toute une série d'autres fluorures, qui sont surtout des curiosités minéralogiques, comme l'*ytrocécrite*, la *fluocécrite*, la *fluellite*, la *chiolite*, la *thomsenolite*, etc.

Mais on trouve, en outre, du fluor, en quantités moins fortes, dans beaucoup de minéraux communs, où sa présence est intéressante à signaler comme élément capital de genèse métallogénique.

Nous signalerons d'abord l'*apatite*, qui est, d'ordinaire, un fluophosphate de chaux avec 4,5 à 7,5 de fluorure de calcium, quand elle n'est pas un chloro-phosphate. La tendance du phosphate de chaux à s'assimiler du fluor pour cristalliser se retrouve dans les phosphates sédimentaires et, comme nous venons de le dire, dans les ossements eux-mêmes, d'autant plus riches en fluor, d'après une observation de Ad. Carnot, qu'ils sont plus anciens.

La même association du fluor avec le phosphate se présente dans d'autres phosphates, comme la *wavellite*, qui tient 2 p. 100 de fluor, la *wagnérite*, l'*amblygonite*, où il entre 8 à 10 p. 100 de fluor, la *triplite*, etc.

Parmi les silicates, les *micas* sont fréquemment fluorés, sauf les biotites. La muscovite elle-même ne renferme guère que 0,13 p. 100 de fluor; mais la lépidolite du même groupe arrive à 5-8 p. 100. Les phlogopites contiennent également 1 à 4 de fluor et l'on arrive à 8 dans la variété lithinifère, dite *Zinnwaldite*, où le phosphore apparaît en même temps.

La *topaze*, est un fluo-silicate proprement dit. La *tourmaline* tient 1,75 à 2,5 de fluor.

¹ G. URBAIN a montré (*La phosphorescence cathodique des terres rares*, Ann. Ch. et Phys., 8^e sér., t. 18. 1909) que la phosphorescence et la fluorescence de certaines substances sont dues à des traces de corps étrangers, dilués dans le corps principal. Celui-ci perd sa fluorescence à mesure qu'on le purifie.

On retrouve du fluor dans l'*émeraude*, qui, sans en renfermer dans sa composition théorique, en présente parfois sous la forme de fluor libre, dans ses inclusions.

L'*euclase* tient 0,38 de fluor, etc. Les *humites* et *chondrodites*, qui sont des silicates magnésiens développés par le métamorphisme des calcaires, contiennent jusqu'à 10 p. 100 de fluor.

Métallogénie du fluor. — Quand on groupe les diverses observations relatives aux gisements géologiques du fluor, on constate que le fluor (indépendamment de sa présence accidentelle dans les granulites, les granites sodiques à riebeckite de la Corse), apparaît surtout dans quatre groupes de filons : 1° les filons du groupe stannifère, généralement associés avec des granulites ou des roches de la même famille ; 2° les filons pyriteux ; 3° les filons plombifères, qui correspondent à un type de demi-profondeur, souvent lié avec les microgranulites ; 4° enfin certains filons auro-argentifères, pouvant contenir des combinaisons tellurées, qui semblent se rattacher à des cristallisations relativement superficielles et se rapprochent de roches microgrenues ou microlithiques, telles que les microsyénites, andésites, etc.

1° Au groupe stannifère, on peut rattacher, outre l'existence de la fluorine elle-même dans certains filons stannifères, le cas, également très normal, où l'on trouve, dans des filons connexes, des minéraux comme l'apatite, la wavellite, la topaze, la tourmaline, etc., qui tous renferment un peu de fluor, et dans beaucoup desquels le bore s'associe au fluor.

Bien des exemples de ce genre seront donnés au chapitre de l'étain. Nous verrons, par exemple, au Mount Bischof, en Tasmanie, la roche encaissante pénétrée au loin de fluorine. En beaucoup de points de la Saxe (Graupen, Pöbel), la fluorine se développe aussi bien dans le filon d'étain lui-même que dans la roche encaissante. Souvent aussi la topaze a cristallisé dans toute une zone d'imprégnation le long des mêmes filons. A San Roque, dans la province de Cordoba (Argentine), de beaux filons de fluorine et quartz, avec un peu de feldspath, se rattachent au groupe des pegmatites et quartz stannifères.

Nous rattachons également à ce groupe le cas du filon de cryolite d'Evigtok, au Groenland, qui est un véritable filon stannifère avec association de quelques sulfures.

2° La fluorine est relativement fréquente avec des pyrites (Saint-Julien de Valgalgues, dans le Gard) et il en résulte son association avec nombre d'hématites ou d'oxydes manganésifères développés sur les affleurements de filons pyriteux. On trouve ailleurs (par exemple en Saxe, à Celsnitz) des filons cuivreux à fluorine abondante et sidérose, qui sont en liaison étroite avec des filons stannifères à wolfram et molybdénite, très riches en tourmaline.

3° L'association du fluor au plomb est très fréquente, mais, au lieu de se produire sous les formes variées des minéraux mentionnés précédemment, se traduit, on peut le dire toujours, par l'apparition de la fluorine. On a ainsi, dans des cas extrêmement nombreux, notamment le long de la chaîne hercynienne, dans le Plateau Central, les Vosges, la Bohême, la Saxe, et dans la chaîne pennine anglaise, des filons renfer-

mant, comme minéraux essentiels, fluorine, barytine et galène, dans lesquels nous aurons à nous demander quelle est l'origine des bases, chaux et baryte, probablement empruntées aux roches encaissantes.

Enfin, 4°, il existe un groupe important de filons aurifères, généralement auro-argentifères, dans lesquels le tellurure d'or est associé avec le quartz et la fluorine. C'est le cas dans deux des principaux gisements d'or actuels : à Cripple Creek, au Colorado, où la gangue de l'or est une association intime de quartz et de fluorine, et à Kaaloorlie, en Australie Occidentale. A. Lacroix a montré comment la fluorine s'est développée dans les auréoles de contact des roches sodiques du groupe des syénites néphéliniques à Madagascar, dans l'Yémen, etc., et a rapproché de ce fait la présence de la cryolite dans un granite alcalin du Colorado¹. La découverte récente de l'or dans les auréoles de ces mêmes roches à Madagascar tend à établir une relation d'origine entre l'or et le fluor dans ce cas particulier.

En résumé, Daubrée ne paraît nullement avoir exagéré le rôle du fluor dans les minéralisations filoniennes et il semble, au contraire, qu'on doive l'étendre à beaucoup de minerais filoniens où ce fluor n'apparaît plus. Dans bien des cas, on est tenté d'imaginer que des fluorures ou chlorures métalliques volatils ont dû se dégager en même temps que des vapeurs d'hydrogène sulfuré et que la réaction des uns sur les autres a déterminé la précipitation de beaucoup de métaux à l'état sulfuré dans la place où ils se trouvent actuellement. Ces vapeurs ou eaux fluorées ont dû, en même temps, agir sur les roches encaissantes pour leur emprunter une partie de leurs bases diverses. De celles-ci, les alcalis, qui donnaient des fluorures solubles, seront montés jusqu'au jour et se seront épanchés dans les caux; le fluorure (ou chlorure) de calcium, au contraire, s'est précipité sur place; et peut-être le fluorure de baryum est-il intervenu pour déterminer la précipitation de la baryte en présence du soufre et de l'eau sous la forme de son sulfate insoluble.

Enfin, il est impossible, en parlant du fluor, de négliger ses remises en mouvement². Il en est de la fluorine comme de beaucoup d'autres substances, qui passent en chimie pour à peu près insolubles, et qui, en géologie, donnent constamment les preuves de leur transport aqueux. La fluorine a recristallisé en stalactites dans les mines du Derbyshire. Elle s'est déposée à Plombières dans les cavités du béton romain. On la trouve également d'une façon constante dans des terrains sédimentaires³, notamment dans le lutétien de Paris, où l'on ne croyait autrefois pouvoir expliquer sa présence que par l'intervention de geysers invraisemblables. Cette fluorine est là associée avec de la silice également remise en mouvement, et parfois avec de la baryte, qui s'est déplacée dans les mêmes circonstances.

Nous rattachons encore à une remise en mouvement du même genre

¹ (2° *Mémoire sur les roches alcalines d'Amplasindara (Madagascar)*, 1903, p. 91 et 243.

² Il faut 26.545 parties d'eau à 15° pour dissoudre une partie de fluorine naturelle; mais la présence de l'acide carbonique, qui est constante dans les eaux de surface, augmente déjà la solubilité.

³ Voir 1897. LACROIX. *Le gypse de Paris*, p. 27. La fluorine a été signalée également dans les calcaires urgoniens de Salève (Haute-Savoie).

les concentrations de fluorine, qui se sont faites, en même temps que celles de barytine et de psilomélane, dans le gîte profondément altéré de Romagné (Saône-et-Loire).

Parmi les très nombreux gisements de fluorine, nous allons seulement en décrire quelques-uns, qui se signalent par leur importance pratique.

GISEMENTS DE FLUORINE ¹

Angleterre (Derbyshire², etc.). — On doit citer, comme particulièrement importantes, les mines du *Derbyshire*, autour de Castleton (Blue John Mine), etc., où la fluorine se présente, comme nous allons le dire, en filons de remaniement incrustant des fissures du calcaire carbonifère. C'est un des rares endroits dans le monde où l'on exploite de la fluorine en masse pour y tailler des objets d'ornement. On a également tiré, dans ces dernières années, beaucoup de fluorine des anciens déblais de mines de plomb à Great Longstone, Eyam et Bradwell, dans la même province.

Ce groupe du Derbyshire se trouve dans le Nord de cette province, à l'Ouest de Sheffield et vers les sources de la Derwent. On exploite là un système intéressant de filons traversant le calcaire carbonifère, le long desquels se sont produits quelques cas tout à fait typiques de remises en mouvement, avec formation de grottes, abîmes, etc. Les gisements originels sont des filons ou imprégnations, tantôt de galène, tantôt de fluorine, qui ont donné lieu à des travaux dès l'époque romaine. Nous aurons, à l'occasion du plomb, à en reparler et à examiner l'influence possible de certaines roches éruptives du groupe des mélaphyres, dites toadstones. Actuellement, nous n'avons à examiner qu'un de ces gisements, où il s'est fait une concentration secondaire de fluorine assez notable pour motiver une petite exploitation : c'est celui de la *Blue-John-Mine*, près de Castleton, où l'on exploite, pour la façonner en vases et objets divers, de la fluorine colorée en bleu, violet, etc. D'après E.-A. Martel, la fluorine se présente là, tantôt en stalactites pendant de la voûte, tantôt en couches horizontales avec de la barytine, dont nous retrouvons ici une fois de plus l'association classique, tantôt en blocs isolés dans l'argile, ou encore en veines empâtant des noyaux calcaires. Au contact de ces veines, il existe un véritable labyrinthe de fissures naturelles et de grottes prou-

¹ Coll. Ecole des Mines, 1811 à 1814. — Voir : 1890. *Mineral Resources*, 468. — 1895. VALENTIN. (Z. f. pr. G., p. 459). — 1896. VALENTIN. *Ueber das Flusspath Vork San Roque in der Argentin, prov. Cordoba* (Z. f. pr. G., p. 104). — 1899. MOISSAN. *Le fluor et ses composés* (Steinheil). — 1899. *Fluorine aux Etats-Unis* (Z. f. pr. G., p. 268). — GUILLET. *Industrie des métalloïdes*, p. 14-21. — 1901. MAUSSIER. *Les filons métat. à gangue de spath fluor de la région de Langeac* (Soc. Int. min., C. R., juillet, p. 198-204). — 1907. FOHS. JULIUS. *Fluorspar Dep. of Kentucky* (Kent. Geol. Surv., n° 9.) — 1908. EGGLESTONE. *Occurrence and Commercial Uses of Fluorspar* (Tr. N. of Eng. Inst. of Min. and Mech. Eng., t. 58). — 1906. PRIEHAUSSER. *Die Fluorsspat-gänge der Oberpfalz* (Z. f. pr. G., juill.).

² 1862. TAYLOR. *Geology of Castleton* (Trans. of the Manchester geol. Soc., t. 3, p. 73 et *Geologist.*, t. 5, p. 86-89). — 1876. MELLO. *Handbook to the geology of Derbyshire*, in-8° London. — 1880. STOKES. *Lead and Leadmining in Derbyshire* (Trans. of the Chesterfield and Derbyshire Institution Engin, t. 7, p. 69; continué en 1882, t. 9, p. 360). — 1887. GREEN, LE NEVE FORSTER, DAKINS et STRAHAN. *The Geol. of N. Derbyshire* (Mem. of the Geol. Surv., 212 p. et bibl. — 1896. E.-A. MARTEL. *Irlande et cavernes anglaises* (Delagrave, p. 303).

vant la circulation récente des eaux descendantes, auxquelles on doit attribuer le déplacement et la reprécipitation, sous sa forme actuelle, de la fluorine. Par ces remaniements, ce gisement se rapproche de ceux de Leadville et de Bulgar Dagh que nous aurons à étudier au chapitre du plomb.

En Angleterre, il existe deux autres centres d'exploitation pour la fluorine métallurgique : la Weardale Lead Co (Durham) et la Taman Silver Lead (Devon).

France (Haute-Loire)¹. — En France, il existe, autour de Langeac, Paulhaguet, Brioude, dans la Haute-Loire, tout un groupe de filons renfermant, parfois sur un mètre ou deux d'épaisseur, de belles masses de fluorine et de barytine. On a également exploité un filon de ce genre à Vaux-Renard (Rhône). Mais la fluorine abonde surtout dans le Plateau Central en veines minces et multipliées, par conséquent inexploitable.

Un semblable filon donne naissance à la source de Bourbon l'Archambault dans l'Allier, où l'on trouve la fluorine verte abondante, et c'est également sur des filons à fluorine que se trouvent les sources de Nérès dans l'Allier, de Plombières dans les Vosges, etc. Nombre de filons plombés dans le Plateau Central et les Vosges, contiennent de la fluorine. Cette fluorine est généralement colorée en vert ou en violet.

Dans les Basses-Pyrénées, on a exploité un moment à *Roumiga* (sur le chemin de Gabas à Penticosa), pour les fabriques d'aluminium, de la fluorine particulièrement blanche et limpide, qui traverse des schistes siliceux.

États-Unis². — Aux États-Unis, de même qu'en Europe, une grande partie de la fluorine est extraite comme gangue de filons plombifères. La production principale est dans l'Illinois, qui fournit à lui seul 30 à 40 000 t., (36 000 en 1909). On y cite spécialement les mines de Rosiclare et Fairview, dont la seconde travaille à 160 m. de profondeur sur une lentille de fluorine de 6 m. d'épaisseur. Dans l'Arizona, on a exploité, en 1908, à Dome (comté d'Yuma). Diverses exploitations ont existé encore dans le Kentucky, toujours sur de la fluorine associée à de la galène, parfois avec de la blende. Les gisements du Kentucky et de l'Illinois suivent des failles dans les calcaires du Mississipi, au voisinage de dykes éruptifs : par conséquent dans des conditions assez analogues à ce que nous avons rencontré en Angleterre.

Prusse. — Deux mines de fluorine, situées dans le district minier de Halle, dont l'une à Flussschacht, près Ufrungen, produisaient, il y a quelques années, 2 500 à 3 000 t.

GISEMENTS DE CRYOLITE

Le gisement à peu près unique de cette substance et qui en garde toujours le monopole industriel, est situé dans l'Ouest du Groenland, à *Evigtok*, près la baie d'Arksut, ou Arsusuk, par 62° latitude Nord³.

¹ Gisements visités en 1905. — LACROIX. *Minéralogie de la France*, t. 2, p. 779 à 794.

² 1909. BURCHARD. *Fluorspar in Colorado* (Min. and. sci. press., 21 août). — 1909. FOHS. *Kentucky Fluorspar* (Tr. Am. I. M. E., avril, p. 411-423).

³ 1880. JOHNSTRUP. *Kryolithens Forekomst*; Grönland. (Förh. skand. Naturforsk, 234). — 1892. CH. HART. (Journ. of. an. and appl. chemistry, oct.). — 1893. Stat. de l'Engineering.

Exploité depuis la fin du XVIII^e siècle pour la préparation de la soude, il a été, depuis 1850, l'objet de travaux importants, lorsque le professeur Thomsen, de Copenhague, eût trouvé le moyen d'en extraire la soude sous la forme d'un aluminat, en faisant bouillir la cryolite pulvérisée avec un lait de chaux. Vers 1870, les carrières fournissaient environ 20 000 t. de cryolite. Plus récemment, on est tombé à 8 ou 9 000 t. par an, puis, en 1907, à 5 000 t. L'exploitation motive tous les ans l'envoi d'une flottille spéciale amenant et emmenant les mineurs. La cryolite importée en Europe est monopolisée par une maison allemande, Gærish et C^{ie}, qui la vendait un moment jusqu'à 800 fr la tonne.

Le gisement d'Evigtok, qui avait depuis longtemps attiré l'attention des Esquimaux par la lourdeur de ses pierres blanches, a été d'abord exploité superficiellement. Plus tard, on a reconnu que son affleurement dessinait une ellipse de 150 m. sur 54, et l'on a pu s'enfoncer jusqu'à 65 m. de profondeur. Ce filon de cryolite forme l'axe d'un remplissage pegmatoïde, qui apparaît sur ses deux bords S. E. et N. W. et qui, lui-même, est encaissé totalement dans un granite porphyroïde. C'est un accident très exceptionnel de cette pegmatite. Au S. E., on a ainsi un agrégat à grands cristaux de microcline, quartz et cryolite avec beaucoup de minerais: sidérose, cassitérite, wolfram, molybdénite, pyrite et chalcopryrite, un peu de galène et de blende, fluorine, columbite. La lentille même de cryolite englobe des minéraux analogues en faible proportion, un peu de sidérose et de quartz, des sulfures rares. Ussing a signalé, au milieu d'elle, des enclaves granitiques de plus de 2 m. de diamètre et, du côté Nord, des masses de fluorine et pyrite qui ont pénétré dans le granite porphyroïde encaissant.

On remarque, dans ce gisement de type stannifère, non seulement le développement des sulfures, mais aussi celui de la sidérite, qui est assez abondante pour devenir une gêne industrielle¹.

Les autres gisements connus de cryolite ne sont guère que des gisements minéralogiques, mais présentent la cryolite dans des conditions analogues.

Aux environs de *Miask*, dans l'Oural, elle est associée avec de la topaze, de la fluorine et de la chiolite (autre fluorure double d'aluminium et de silicium).

A *San Peter's Dome*, au Colorado², un gisement intéressant présente des pegmatites à riebeckite (amphibole noire sodique), très riches en zircon, dans lesquelles se sont développés la fluorine, la cryolite et ses produits d'altération.

p. 165. — 1894. MARSILLON. *Une mine d'aluminium* (Evigtok) (La Nature, 28 avril). — 1902. USSING. *Mineral product i Danmark ved 1900* (Denmark geol. Undersøgelse, t. 2, p. 97-104. — 1907-08. USSING. *Kryoliten ved Ivigtuk*. (Geogr. Tidskrift, 19, t. 5, p. 194-200, avec bibl.).

¹ Voir plus haut, p. 309, la même association de sidérite avec un groupe stannifère à Oëlsnitz.

² * 1885. CROSS et HILLEBRAND. Bull. U. S. Geol. Survey, n° 20, 40. — 1889. A. LACROIX. C. R., t. 109, p. 39. — 1902. LACROIX. *Les roches alcalines d'Ampasindava*, p. 89.

CHLORE

Cl — 35,46

Usages. — Le chlore joue un rôle important dans l'industrie sous les formes de chlore, d'acide chlorhydrique, de chlorure de chaux et d'hypochlorites décolorants. Les chlorures de potassium et de sodium ont des emplois très développés, dont il sera question à l'occasion des minéraux correspondants. On se sert également de quelques chlorures métalliques.

Le *chlore* se prépare surtout : 1° par les procédés au bioxyde de manganèse avec régénération, tels que le procédé Weldon; 2° par le procédé anglais Deacon, qui décompose l'acide par l'oxygène en faisant passer le mélange gazeux sur des sels de cuivre ou de plomb à température relativement basse, en utilisant le gaz chlorhydrique des fabriques de sulfate de soude; 3° par la décomposition du chlorhydrate d'ammoniaque en présence d'oxydes métalliques, avec formation de chlorure métallique instable; 4° par la décomposition du chlorure de magnésium, etc.

Le chlore gazeux, ainsi obtenu, sert principalement à fabriquer des chlorates ou hypochlorites en barbotant dans une lessive de potasse, de soude ou de chaux. On utilise encore le chlore gazeux dans diverses industries: par exemple, dans le traitement de certains minerais d'or, ou, en chimie organique, dans la préparation des dérivés chlorés.

On fabrique, surtout en Allemagne et en Belgique, une certaine quantité de chlore liquide, qui se transporte dans des cylindres d'acier et coûte environ 2 fr. le kg.

L'*acide chlorhydrique* est obtenu: soit par la décomposition des chlorures alcalins, et surtout du chlorure de sodium, en présence de l'acide sulfurique, soit par la décomposition du chlorure de magnésium. Ce qui ne sert pas à la fabrication du chlore, comme nous venons de le voir, est employé à l'extraction de la gélatine des os (en dissolvant la partie minérale), à la préparation des chlorures d'étain et de zinc, de l'anhydride carbonique, etc.

L'emploi des *chlorures décolorants* (hypochlorites) est dû à l'affinité extrême du chlore pour l'hydrogène qui en fait un oxydant énergique en présence des substances non azotées. On fabrique les hypochlorites de sodium, de potassium et de calcium en partant des chlorures de sodium ou de potassium. Pour obtenir le « chlorure de chaux », on fait circuler du chlore gazeux sur de la chaux, qui doit avoir été bien calcinée et ne pas contenir d'acide carbonique.

Minerais. — La plus grande partie du chlore utilisé dans l'industrie provient du chlorure de sodium. On utilise également les chlorures de potassium et de magnésium¹. Ces composés du chlore, qui sont aisément solubles, ont actuellement leur gisement le plus important dans les eaux de la mer. L'évaporation localisée de lagunes marines ou d'eaux saumâtres dans des régions désertiques pendant les époques géologiques anté-

¹ Voir aux chapitres concernant ces métaux, tome II, p. 96 et 211.

rieures, a donné également des gisements de chlorures alcalins ou magnésiens encaissés dans divers étages (notamment, en Europe, dans la période permo-triasique et la période tertiaire), dont il sera question ultérieurement. Si l'on cherche le rôle géologique du chlore, il faut, en outre, mentionner sa présence très habituelle, à l'état de traces, dans les roches cristallines, où il remplit des inclusions microscopiques. Ce chlorure des roches peut à la rigueur suffire à expliquer les fumerolles volcaniques, dans lesquelles le rôle du chlore est capital ; mais il est possible également que ces fumerolles puisent directement leur chlore dans la même réserve profonde, à laquelle l'ont empruntée les roches ; et l'on peut imaginer encore un retour en profondeur par infiltration des chlorures superficiels. La cotunnite (chlorure de plomb) des laves du Vésuve est un exemple spécial de telles formations chlorurées dans les roches.

L'existence de ce chlore interne, auquel on est conduit à attribuer une part importante dans les cristallisations de filons métallifères, se manifeste encore dans certains minéraux des roches à minéralisateurs énergiques, qui contiennent un peu de chlore dans leur composition, tels que les minéraux habituellement fluorés, où le chlore peut remplacer le fluor (apatite, etc.), et d'autres minéraux dont la constitution peut accuser un apport de chlore, comme les wernérites associées aux filons d'apatite.

Étant donné la grande solubilité du chlorure de sodium, cet élément existe à peu près toujours dans les eaux de surface et s'y manifeste dès que celles-ci subissent un commencement de concentration. On peut expliquer ainsi l'apparition de chlorures métalliques, et spécialement de chlorures d'argent, sur les affleurements de filons argentifères situés dans les régions sèches, celle des pyromorphites, mimétèses (où le chlore s'allie au phosphore ou à l'arsenic), sur les affleurements de plomb, etc., de la cotunnite dans d'autres cas.

BROME

Br = 79,92.

Usages. — Le brome a deux usages principaux : la photographie qui l'emploie sous la forme de bromure d'argent et la thérapeutique (bromures de potassium et de sodium, bromhydrate de quinine, etc.). On en consomme également une certaine quantité dans la fabrication de diverses matières colorantes, comme le bleu Hoffmann, l'éosine (ou fluorescine tétrabromée). Enfin, il joue le rôle d'oxydant, habituellement attribué au chlore, dans quelques fabrications, comme celles du ferricyanure de potassium et du permanganate. Comme désinfectant, il est parfois utilisé sous la forme de silice agglomérée et imprégnée de brome ; c'est ce qu'on appelle le brome solide. La métallurgie de l'or en consomme un peu (cyanuration).

La production du brome dans le monde est restreinte. Jadis on l'extrayait uniquement des cendres de varechs ou des eaux mères de marais salants. Ce qu'il subsiste de cette industrie produit environ 20 t. en Ecosse

et 5 à 6 t. en France¹. Le grand centre de production industriel en Europe est, depuis 1865, le bassin de *Stassfurt*, qui en produit, sous la forme minérale, à peu près 300 t. Les Etats-unis arrivent à 500 t. en traitant les eaux mères de certaines salines, qui représentent, en réalité, une forme de gisement analogue à celle de *Stassfurt*. Le principal Etat producteur américain est le Michigan, avec la *Dow Chem. Cy* et la *Saginaw Salt Cy*, qui en fournit environ les cinq sixièmes. Puis viennent l'Ohio, la Pennsylvanie et la Virginie Occidentale².

Le prix du brome qui, vers 1870, était de 60 à 70 fr. le kg., est tombé à 3 ou 4 fr. ; il est remonté à 6,75 fr. en 1900, puis redescendu progressivement à 4,10 fr. en 1909. Le bromure de potassium a valu, en 1909, environ 2,20 fr. En 1911, il vaut au détail 4,50 fr.

Gisements. — Il est probable qu'une analyse suffisamment précise des roches cristallines y décèlerait la présence du brome, comme elle reconnaît celle du chlore. Mais la place actuelle du brome n'est plus dans ces roches cristallines ni dans les filons métallifères ; elle est toute dans les produits de surface. La grande solubilité des sels de brome a dû, en admettant que les eaux métallisantes de nos filons en aient contenu autrefois, maintenir ces sels en dissolution jusqu'à la surface et, par conséquent, amener l'épanchement du brome au dehors. Quoi qu'il en soit, le grand gisement actuel du brome est dans l'eau de la mer, ou, plus généralement, dans toutes les eaux. Marchand en a signalé jusque dans l'eau provenant de la pluie ou de la fusion des neiges. Ces traces de brome arrivent à la mer, qui en contient environ 0,65 gr. par litre : la proportion du brome au chlore étant là de 34 à 10 000. Dans certains bassins de concentration, dont la mer Morte est le type le plus connu, cette teneur en brome augmente (0,71 p. 100 de brome dans la mer Morte à 300 m. de profondeur). C'est ce qui explique les concentrations de brome observées dans certains terrains salifères des étapes géologiques, notamment dans ceux où l'évaporation a été poussée assez loin pour amener la cristallisation des sels déliquescents, comme à *Stassfurt*, et, par conséquent, dans les eaux qui se sont minéralisées au contact de tels gisements, comme à *Kreuznach*. Pour la même raison encore, un peu de brome s'est trouvé introduit et fixé dans les affleurements de quelques filons métallifères, en particulier dans le cas des filons d'argent, ou dans des minerais fortement altérés comme ceux de Silésie.

D'autre part, les êtres vivants s'assimilent une partie des bromures renfermés à l'état de traces dans les eaux. Cette assimilation, particulièrement marquée dans certains varechs, a permis de traiter industriellement les cendres de ces varechs. Il faut peut-être attribuer à la même cause l'existence du brome dans les phosphorites ; en tout cas, ces phosphorites accusent une longue période d'altération superficielle, où le brome aurait pu être introduit, comme dans le haut des filons d'argent.

Nous aurons à revenir sur le gisement de *Stassfurt* au chapitre du

¹ 1902. L. DE LAUNAY. *L'utilisation chimique des varechs. Extraction française de l'iode et du brome* (La Nature, n° 1515, 7 juin).

² OSCAR C. DIEHL. *The mineral Industry during 1909*.

potassium. On y tire le brome des eaux mères laissées par la fabrication du chlorure de potassium. Généralement, pour l'exportation, on combine le brome au fer et on évapore à siccité. On fabrique, en outre, les divers bromures de potassium, sodium, calcium et magnésium.

IODE¹

l = 126,92.

Usages. — L'iode a des usages analogues à ceux du brome : photographie, thérapeutique, matières colorantes. En thérapeutique, on emploie la teinture d'iode, les iodures de potassium, sodium, lithium et fer, l'iodoforme, l'iodol, etc. Comme matières colorantes, on peut citer le violet et le vert à l'iode. L'extraction de l'or consomme encore un peu d'iode dans le procédé Claudet. Enfin, on fabrique divers iodures alcooliques, comme les iodures d'éthyle et de méthyle.

L'extraction de l'iode se fait encore en partie par le traitement des cendres de varechs, qui donne 125 t. en Ecosse et Irlande, 35 t. en France, 13 t. en Norvège, 11 t. au Japon. Il existe, en outre, deux sources minérales : 1^o les nitrates du Chili, qui ont donné jusqu'à 600 t. en 1893, 206 en 1896, 564 en 1905, 290 en 1909, et qui donneraient aisément plus si le marché le comportait ; 2^o les phosphorites, citées seulement ici pour mémoire. L'Allemagne a passé de 26 t. en 1896 à 50 t. en 1907.

Le prix de l'iode de sublimation, qui était, en 1889, de 36 fr. le kg en France, est descendu à 24 en 1900, 21 en 1902. Il est très variable, comme l'est également l'état du marché, ainsi que l'auront montré les chiffres précédents relatifs à la production du Chili. La production française est protégée par un droit d'entrée de 5 fr le kg. et le commerce de l'iode est réglementé par un syndicat.

Huit usines, situées en Bretagne, produisent l'iode consommé en France qui vaut au détail (1911) 32 fr. le kg.

Gisements. — Nous pourrions reproduire ici une grande partie de ce qui a été dit pour le brome : traces dans les fumerolles volcaniques (Vésuve); absence dans les filons, sauf dans leurs altérations d'affleurement, avec l'argent, le mercure, le plomb, le cuivre et le zinc; présence dans les eaux, même dans les eaux de pluie, et dans leurs produits d'évaporation; assimilation par les organismes, non seulement par les êtres marins, mais même par l'homme (corps thyroïde). Il y a, cependant, entre les deux corps, quelques différences à signaler.

Tout d'abord, nous avons remarqué que l'iode est peu extrait à Stassfurt. Cependant, il existe dans la mer, et la preuve directe en est fournie par les varechs qui l'y trouvent pour se l'assimiler. A. Gautier a montré qu'il faut distinguer, dans l'eau de mer, l'iode minéral qui, absent au voisinage de la surface parce que les végétaux l'y ont pris, augmente avec

¹ 1899. DIESELDORFF. *Ueber jodhaltige Kupfererze aus Neu Sud-Wales* (Z. f. pr. G., p. 321, 412). — 1902. L. DE LAUNAY. *L'utilisation chimique des varechs* (La Nature, n° 1515, 7 juin). — GUILLET. *L'industrie des métalloïdes* (Gauthier-Villars).

la profondeur et l'iode organisé qui décroît rapidement quand on s'enfonce. La somme des deux est à peu près constante de 2,25 mgr. par litre : quantité faible par rapport à la teneur en brome.

Par contre, les nitrates du Chili sont une source sérieuse d'iode et non pas de brome; si bien que, comme nous l'avons dit précédemment¹, on a voulu en conclure nécessairement leur formation par l'intermédiaire de végétaux : hypothèse qui n'est nullement nécessaire puisque l'iode existe dans toutes les eaux. Les phosphates, signalés à propos du brome, contiennent aussi de l'iode, qui se dégage au moment de leur transformation en superphosphates. On a encore signalé la présence d'iode dans les eaux salées des gisements pétrolifères : ce qui concorde avec l'association ordinaire du sel au pétrole et peut également s'expliquer par l'origine de celui-ci. En Pennsylvanie, on arrive à 0,6 gr. d'iodure de calcium par litre, tandis qu'à Bakou il y a seulement quelques centigrammes.

Si nous envisageons d'abord les varechs, tous ne sont pas également utilisables. Les bons goemons sont les rouges, tandis que les noirs sont à rejeter. Après calcination, on a, pour 100 parties de cendres, outre 58,4 de résidus insolubles, 18 de chlorate de potasse, 15 de chlorure de sodium, 6 de sulfate de potasse, 2 de sulfate de soude, 0,5 d'iode et 0,075 de brome. Pratiquement, on peut compter qu'une tonne de cendres de varechs donne environ 4 kg. d'iode et 400 gr. de brome.

Au Chili, la production d'iode pourrait aisément être plus forte, si la consommation, qui reste stationnaire, s'accroissait un peu. On a d'abord reconnu la présence de cet iode par hasard en voyant une réaction bleue sur les matières qu'on employait comme précipitants. La teneur en iode des nitrates (Caliche brun ou Chancacado) est de 0,059 à 0,175 p. 100.

¹ Page 300.

CHAPITRE XVI

SOUFRE, SÉLENIUM ET TELLURE

SOUFRE NATIF ET PYRITES

SOUFRE

S = 32,07.

Histoire de l'industrie du soufre¹. — Le soufre et ses principaux composés ont un certain nombre d'usages, que nous allons énumérer, mais parmi lesquels il en est un d'une importance tout à fait spéciale : c'est la production de l'acide sulfurique, dont les emplois sont tels eux-mêmes qu'on a pu considérer sa consommation comme un critérium du développement industriel dans un pays. Avec l'extension de cette industrie de l'acide sulfurique, on a donc vu se développer parallèlement l'industrie extractive des minerais de soufre, envisagée dans son ensemble ; mais la répartition de cette production entre les deux principales sources de soufre, qui sont les minerais de soufre natif et les pyrites, a subi des fluctuations, dont le bref exposé peut présenter quelque intérêt économique.

Bien que l'on ait fabriqué de l'acide sulfurique depuis 1666 et que l'invention des chambres de plomb date de 1746, avant le xix^e siècle, l'industrie du soufre était restreinte et la Sicile, avec ses minerais de soufre natif, avait à peu près le monopole de cette production. Ce monopole devint très fructueux quand la découverte de Leblanc eut fait prendre l'acide sulfurique pour base de la fabrication de la soude.

Vers 1835, les producteurs purent même s'entendre pour tripler du jour au lendemain le prix du soufre. Mais, en 1837, Michel Perret trouva le moyen de substituer la pyrite au soufre. Comme la marcassite cristallisée renferme 52 p. 100 de soufre, il faut en pratique à peu près une tonne de pyrite marchande pour obtenir une tonne d'acide sulfurique. On mit alors en exploitation quelques grands gisements pyriteux (Vénétie, Scandinavie, Sud de l'Espagne, France, etc.), auxquels vinrent bientôt se joindre les pyrites cuivreuses, donnant de l'acide sulfurique comme

¹ Sur les généralités relatives au soufre, voir : 1874. BRUNFAUT, *De l'exploitation des soufres* (Gr. in-8° de 620 pages, chez Amb. Lefèvre, Paris). — 1894. KEMP, *Sulphur* (Mining Industry de Rothwell, t. 2). — 1897. AICHINO, *Lo Zolfo* (Encycl. delle Arti e industria), avec bibl., p. 1121 à 1178. — 1900. L. DE LAUNAY, *Le soufre* (géologie, extraction) Grande encyclopédie). — Volumes annuels de la *Mineral Industry*, publiée par l'Engineering à New-York. — Statistiques annuelles du gouvernement italien.

sous-produit de leur traitement. Il en résulta, malgré l'accroissement de la consommation totale, une diminution notable dans les emplois du soufre natif et un commencement de malaise en Sicile. Ainsi, dès 1867, l'Angleterre empruntait déjà 150 000 t. de soufre aux pyrites contre 20 000 au soufre natif. Vers ce moment (1861), la découverte du procédé Schloesing et Solvay, qui permet de fabriquer la soude par l'ammoniaque, commença à restreindre peu à peu (sans le supprimer encore), un des grands emplois de l'acide sulfurique et la mise en marche récente des procédés électrolytiques a agi dans le même sens. Ce corps a néanmoins assez d'autres applications pour que son industrie n'en ait pas été fortement atteinte. C'est ainsi que s'établit, jusqu'à la mise en valeur des gisements de Louisiane en 1903, un état de choses, dans lequel le soufre natif, produit pour les 9/10 par la Sicile, avait pris, par rapport aux pyrites, un équilibre dont il est aisé d'indiquer les éléments.

Si nous prenons les grands pays industriels, nous voyons que la France et l'Allemagne, ayant chacune une production suffisante de pyrites indigènes, fabriquent surtout leur acide sulfurique avec ces pyrites, important une certaine quantité de soufre (106 000 t. de soufre non épuré pour la France en 1907) pour les usages où la pyrite ne peut pas le remplacer, comme nous allons bientôt le dire. L'Angleterre, dans les mêmes conditions, importe peu de soufre et s'alimente, pour le reste, soit en pyrite étrangère, soit surtout en minerais sulfurés de cuivre et zinc qui arrivent en quantités considérables à ses usines métallurgiques¹. Tout autre est (ou plutôt était récemment) le cas des Etats-Unis. Ce grand pays a surtout son industrie chimique dans l'Est, loin des gisements de pyrite nationaux, dont la production, nulle il y a une vingtaine d'années, n'est encore aujourd'hui que de 213 000 t., très inférieure à celle de la France. Forcés d'importer des minerais d'acide sulfurique, les Etats-Unis se sont trouvés amener à faire venir en assez forte proportion du soufre, moins lourd à usage égal et ont fourni ainsi longtemps un excellent client pour la Sicile. Ce client a aujourd'hui à peu près disparu par suite de la mise en valeur de très grands gisements de soufre en Louisiane. Ces gisements, qui ont commencé à produire 35 000 t. en 1903, sont montés à 312 000 en 1907 et 1908, 303 000 en 1909. L'importation de soufre aux Etats-Unis est ainsi tombée à 85 000 t. en 1905, 74 600 en 1906, 22 700 en 1907, 21 300 t. en 1908, 31 200 en 1909. Il ne faudrait d'ailleurs pas s'imaginer que les Etats-Unis n'importent pas de pyrite. Cette pyrite, venant pour la presque totalité du Sud d'Espagne, est montée, en 1909, au chiffre de 763 000 t., qui, ajoutées à la production nationale, représentent une consommation de 910 000 t. Une forte proportion de l'acide sulfurique produit en Amérique passe dans les superphosphates.

USAGES, APPLICATIONS DU SOUFRE ET DE SES COMPOSÉS

Si nous passons maintenant en revue les emplois du soufre et de ses principaux composés, ce nous sera une occasion de revenir sur quelques points intéressants de cette question économique.

¹ Outre les pyrites à griller, on importe de plus en plus (depuis 1896) des pyrites déjà lavées pour cuivre, dont il existait des stocks énormes dans le Sud de l'Espagne,

Soufre natif. — Pour l'ensemble du monde, le soufre conserve toujours une application importante dans la fabrication de l'acide sulfurique, bien que cette application soit tombée à peu de chose en Europe. Les Etats-Unis fabriquent encore par ce moyen une grande partie de leur acide sulfurique, avec du soufre qui venait autrefois de la Sicile et vient aujourd'hui de la Louisiane. Nous en avons donné la raison. Même ailleurs, le soufre n'a pas complètement disparu dans cette industrie. Les fours à soufre sont moins coûteux que les fours à pyrite ; les chambres de plomb s'attaquent moins, et l'on obtient un produit, qui, sans aucune épuration, est exempt d'arsenic, contrairement à ce qui se produit d'ordinaire quand on part des pyrites. Or cette présence de l'arsenic, qui est déjà une cause de dépréciation quand on veut employer l'acide au décapage des tôles, devient un cas rédhibitoire pour la fabrication de l'acide citrique, le lavage du noir animal des raffineries, la préparation des levures, les matières colorantes destinées aux sirops, et, généralement, tous les cas où l'acide intervient dans des denrées alimentaires.

Deux autres grands emplois du soufre sont la vulcanisation du caoutchouc, en passant, comme nous allons le dire, par le sulfure de carbone ou le chlorure de soufre, et la viticulture. Cette dernière application a été un moment considérable. A raison de 65 à 150 kg. de soufre par hectare de vigne, les 2 millions d'hectares de vignes françaises auraient pu fournir un débouché important aux soufres de Sicile ; mais la généralisation de l'emploi des plants américains a beaucoup ralenti cet usage.

Il reste, en outre, toute une série de petites applications secondaires : composition de la poudre à canon et des produits pyrotechniques, fabrication des allumettes, moulages, usages pharmaceutiques (traitement des maladies cutanées), blanchiment de la laine et de la paille, désinfection des tonneaux, conservation du vin et du houblon, scellement du fer dans la pierre, fabrication du sulfure de carbone, du chlorure de soufre, des thio-sulfates, de l'outrigger, de certains sulfures métalliques, comme le cinabre et l'or mussif, etc.

Au total, le monde absorbe par an (non compris les pyrites) environ 830 000 t. de soufre en 1909, contre 400 000 t. en 1883. Sur ce chiffre, les Etats-Unis, à eux seuls, consomment environ 300 000 t. : 306 000 t. en 1908, 247 000 t. en 1909. Les exportations de Sicile, qui alimentent le reste du marché, fournissent (1909) 67 000 t. à la France, 50 000 à l'Italie, 29 000 à l'Allemagne, 25 000 à l'Autriche, 19 000 à l'Angleterre et 18 000 à la Scandinavie, etc... Si l'on cherche la répartition possible de ces emplois, on arrive, à titre tout à fait approximatif, aux chiffres suivants :

Fabrication de l'acide sulfurique	385.000
Agriculture	220.000
Sulfure de carbone (5 200 tonnes en France).	44.000
Poudre et produits pyrotechniques	55.000
Usages divers	126.000
	<hr/>
	830.000

La France importe environ 130 000 t. de soufre non épuré, à teneur très variable et dont il est difficile de dire la correspondance exacte en soufre proprement dit. Quelques-unes des plus importantes raffineries

pour le soufre de Sicile sont établies à Marseille, la Sicile manquant de combustible, et la France réexporte 8 000 t. de soufre épuré ou sublimé.

Les prix du soufre raffiné ont été de 200 fr. la tonne en 1890, de 140 fr. en 1895, de 190 fr. en 1900, 220 à 250 en 1909¹.

Hydrogène sulfuré. — Ce corps est surtout employé dans l'analyse chimique; mais on s'en sert aussi pour enlever aux solutions le plomb et l'arsenic qu'elles peuvent contenir.

La solution sulfurique du **sesquioxyde de soufre** sert dans la préparation de certaines couleurs sulfurées, telles que la thiopyronine.

Les **hydrosulfites** sont employés en teinture et en impression pour réduire l'indigo en indigo blanc.

Le **gaz sulfureux** a des applications nombreuses. Depuis 1883, l'industrie du gaz sulfureux liquéfié s'est très développée, surtout en Allemagne où l'on applique les brevets Hanisch et Schröder. On commence par dissoudre dans l'eau les gaz venant du grillage de sulfures métalliques, tels que les blendes ou les pyrites; puis on chauffe la solution, on dessèche le gaz produit et on le comprime dans des cylindres d'acier fondu essayés à 30 atmosphères, dont on laisse un tiers vide pour parer à la vaporisation que produit la moindre élévation de température.

L'usine de Lipine, en Silésie, produit par an 1 000 t. d'acide sulfureux liquide coûtant environ 125 fr. la tonne. Avec les autres usines d'Hamborn, Oberhausen, etc., on arrive, pour l'Allemagne, à 3 000 t.

Ce produit est employé dans les industries suivantes: fabrication de cellulose, blanchiment des textiles, laine et soie, désagrégation et blanchiment de la fibre de bois au sulfate de soude, traitement des os, extraction des graisses et huiles, extincteurs d'incendies, machines à glace Pictet, etc.

Le **sulfite de soude** est employé en grand dans les fabriques de papier.

Acide sulfurique². — La production de l'acide sulfurique en Europe dépasse de beaucoup 2 000 000 t.³ Dès 1897, l'Allemagne produisait 850 000 t. d'acide à 66°. La production française atteint à peu près le même chiffre avec de l'acide moins concentré employé pour les superphosphates. L'industrie des superphosphates peut assurer par an le placement d'au moins 600 000 t. de pyrite, le tiers de la production mondiale.

En dehors du sulfate de soude et des superphosphates, on peut citer, parmi les principales applications de l'acide sulfurique, la métallurgie, l'industrie de l'alcool, le tannage, la préparation de l'acide chlorhydrique, des acides organiques, des acides fluorhydrique et borique, le décapage des métaux, le raffinage du pétrole brut, l'épuration des huiles, les explosifs, etc. Aux États-Unis, on estime que les superphosphates absorbent 53 p. 100 de l'acide sulfurique produit, le raffinage du pétrole brut 35 p. 100, et les autres usages 12 p. 100.

Nous aurons l'occasion de signaler, à propos des bases correspon-

¹ En 1909, on a établi en France un droit d'entrée sur le soufre tenant plus de 98 p. 100: droit qui frappe le soufre de Louisiane à l'avantage du soufre brut de Sicile. Au détail, le soufre en canons vaut 0,40 fr. le kg.

² 1879. LUNGE. *Fabric. de la soude* (trad.) (Paris, Masson) et 2^e édit. allemande, Braunschweig, 1893. — 1907. *Commercial uses of Sulphuric acid* (Mineral Industry, t. 15).

³ Le monohydrate sulfurique contient 32,69 de soufre.

dantes, un grand nombre de sulfates utilisés en industrie : sulfates de potasse, de soude, de chaux, de fer, de cuivre, de zinc, etc...

Sulfure de carbone. — Ce corps, qui est chimiquement le bisulfure à 84,24 p. 100 de soufre, se prépare pratiquement en faisant passer de la vapeur de soufre sur du coke.

On l'emploie : dans la vulcanisation du caoutchouc (depuis 1850)¹; dans l'extraction des huiles essentielles et des parfums ; dans l'extraction des corps gras retenus par les tourteaux d'huiles, les chiffons de graissage ; dans le traitement du phylloxéra et la conservation des grains ou des aliments ; enfin, en médecine, comme anesthésique local ou désinfectant.

Les sulfocarbonates alcalins sont également employés pour combattre les maladies cryptogamiques des végétaux, le sulfure de carbone en formant la partie active.

Le sulfure de carbone, dont on fabrique en France 5 200 t., valait en gros, 600 fr. la tonne en 1890 et 500 fr. en 1900. Il vaut au détail 1 fr. le kg. en 1914.

Le **chlorure de soufre** est employé dans la vulcanisation du caoutchouc.

La **monochlorhydrine sulfurique** sert dans la préparation de la saccharine.

STATISTIQUE

Pour subvenir aux divers besoins précédemment énumérés, on utilise pratiquement deux sources principales de soufre : le soufre natif et les pyrites, auxquelles il faut joindre des sulfures, tels que les pyrites cuivreuses et les blendes, donnant du soufre comme produit secondaire dans les pays de grande industrie chimique et métallurgique.

Les tableaux suivants résument la production de minerais de soufre et de pyrite dans le monde, à environ trente ans d'intervalle.

TABLEAU 41. PRODUCTION MONDIALE DES MINERAIS DE SOUFRE

PAYS	1883		1907		1909
	Quantité en tonnes.	Prix sur place.	Quantité en tonnes	Prix sur place.	Quantité en tonnes,
a) Minerais pauvres :					
Espagne	32 691	16 à 20	29 000	6,20	14 000
Grèce	44 000		1 000	»	1 000
Russie	346		16 000	»	»
Japon	10 000		33 000	56 »	35 000
France (Vaucluse)	649		2 000	12,30	2 000
Autriche	»	24 000	11,40	17 000	
b) Soufre natif :					
Italie et Sicile	360 000		427 000		445 000 ¹
Etats-Unis (Louisiane)	»		312 000		303 000
Total approximatif, ramené en soufre natif.	400 000	101 fr.	800 000	112 fr.	830 000

¹ Chiffre de 1908.

¹ Il entre 8 p. 100 de soufre dans la gomme élastique; 20 p. 100 dans l'ébonite.

L'Angleterre produit, en outre, 20 à 30 000 tonnes de soufre par le procédé Chance-Claus.

TABLEAU 12. PRODUCTION MONDIALE DES PYRITES DE FER

PAYS	1883	1907		1908	1909
	Quantité en tonnes.	Quantité en tonnes.	Prix sur place.	Quantité en tonnes.	Quantité en tonnes.
France (Sain Bel)	165 000	283 000	15,40	284 700	273 000
Norvège (inclus pyr. de cuivre.	»	236 000	36,32	295 000	»
Espagne (Huelva)	»	225 000	4,60	263 000	»
Etats-Unis (inclus pyr. de cuivre)	25 400	266 000	16,58	209 700	213 400
Prusse (Rammelsberg, etc.) . .	149 000	196 000	10,80	219 000	198 700
Italie	6 620	127 000	16,80	132 000	132 000
Portugal (Sud)	»	351 000	10,58	365 000	106 000
Hongrie	»	99 000	8,60	96 000	99 000
Russie	»	18 500	»	56 400	»
Canada	»	35 000	25,10	43 000	52 000
Suède	1 820	27 000	16,70	29 600	16 100
Terre-Neuve	»	28 000	15,29	»	»
Grande-Bretagne	28 000	10 500	11,00	9 600	8 600
Autriche	9 300	»	»	»	»
Total (avec divers)	630 000	1 980 000	»	1 800 000	1 700 000

TABLEAU 13. PRODUCTION MONDIALE DES SOUFRES ET PYRITES

	1881	1889	1896	1900	1905	1907	1908	1909
Pyrite	625 039	601 000	1 071 000	1 464 000	1 789 000	1 980 000	1 758 000	1 687 000
Soufre	400 000	500 000	440 000	560 000	800 000	801 000	829 000	830 000
Total approxi- matif calculé en soufre	712 000	800 000	975 000	1 300 900	1 690 000	1 790 000	1 790 000	1 700 000

TABLEAU 14. CONSOMMATION MOYENNE DES PRINCIPAUX ÉTATS EN 1907

CATÉGORIES DE MINÉRAIS	États-Unis.	Angleterre.	France.	Allemagne.	Italie.	Belgique.	Scandinavie.	Autriche.	TOTAL avec divers.
Soufre natif	300 000	50 000	60 000	37 000	60 000	15 000	25 000	25 000	760 000
Soufre en pyrite, pyrite cuivreuse et blende	450 000	200 000	140 000	100 000	65 000	35 000	25 000	15 000	1 100 000
TOTAUX	750 000	250 000	200 000	137 000	125 000	50 000	50 000	40 000	1 860 000

Répartition de la production des pyrites. — Parmi les pays producteurs que nous venons d'énumérer, la *France* s'alimente en pyrite avec le gisement de Sain Bel dans le Rhône.

En *Norvège* on travaille à Røros, Sulitjelma, etc.

En *Espagne*, le centre de production est celui de la province d'Huelva, qui se prolonge en *Portugal* à San Domingos.

En *Allemagne*, le gisement principal est celui du Rammelsberg.

En *Italie*, on exploite le groupe de Boccheggiano, la Fenice, Gavorrano, etc., en Toscane, et accessoirement Agordo en Vénétie.

En *Hongrie*, le gisement pyriteux est celui de Schmollnitz.

Au *Canada*, on cite les mines de Vermilion dans l'Ouest de l'Ontario et celle de Northland.

En *Russie*, l'usine de Rudyansk, dans le district de Verchné-Isset, travaille les pyrites des mines Bynarski et Kalatinsk.

Aux *Etats-Unis*, la production de pyrite est, en grande partie, pour des raisons industrielles, localisée dans l'Est (Tennessee, Virginie, New-York, Ohio). Dans le *Tennessee*, la Tennessee Copper C^o est installée pour produire par an près de 300 000 t. d'acide sulfurique destiné au traitement des phosphates et la Ducktown Sulphur, Copper and Iron C^o, 50 000 t. Ces compagnies ont le contrôle de tout le commerce de l'acide sulfurique au Sud de l'Ohio. Ce sont, avant tout, des mines de cuivre. Mais les difficultés avec les agriculteurs, qu'ont occasionnées les dommages causés par les fumées du grillage, ont contribué au développement des installations pour utiliser ces fumées à la production d'acide sulfurique. Le gisement de la Tennessee Copper est ouvert sur 600 m. de long par 4 niveaux.

En *Virginie*, la production de pyrite, en 1908, s'est élevée à 717 000 t., dont 76 000 fournies par le comté de Louisa. A Pulaski, on travaille à ciel ouvert des amas de pyrrhotine recouverts par un chapeau de fer oxydé et tenant 27 à 32 p. 100 de soufre.

L'état de *New-York* a produit 24 000 t. (St. Lawrence Pyrite C^o).

ROLE GÉOLOGIQUE DU SOUFRE

Le soufre joue, dans la géologie du globe, un rôle important: moins par sa quantité totale, qui est très minime (environ 0,06 p. 100), que par la manière dont ses combinaisons avec les métaux se sont prêtées aux concentrations de ces métaux dans les fumerolles et les filons. Nous avons discuté précédemment¹ ce qu'il faut entendre par le rôle minéralisateur du soufre. Quand on cherche géologiquement la place naturelle du soufre dans l'écorce terrestre, on ne peut manquer de remarquer sa présence constante dans ce qui est, pour nous, la profondeur, alors qu'à la surface ce corps se présente comme ayant été introduit par accident et par emprunt aux roches et filons. Quelle que soit l'origine première du soufre englobé dans les roches cristallines, il n'en est pas moins certain que la plupart de ces roches, et surtout des roches basiques, contiennent assez de pyrite pour que celle-ci devienne visible au microscope ou même à l'œil nu². Un

¹ Pages 30, 51 et 140.

² La pyrite est rare dans les roches volcaniques tertiaires et quaternaires de France.

départ immédiat de ces sulfures a donné les grands amas pyriteux concentrés à la périphérie de roches basiques, pour lesquels une cristallisation profonde, dans des conditions analogues à celles des laccolithes granitiques, est très vraisemblable. Enfin, par un départ encore plus accentué, ces sulfures sont allés incruster les filons, qui, pour la plupart, présentent, sous leur forme originelle, les métaux précipités de leurs solutions à l'état de sulfures. Et une partie de ces sulfures, arrivant jusqu'au jour dans le volcanisme, donne les solfatares. C'est à ces sulfures cristallisés des roches, des amas filoniens et des filons qu'il est logique de supposer empruntés les sulfates répandus dans les eaux superficielles et dans la mer. ainsi que dans les produits d'évaporation plus ou moins anciens, où l'on trouve, comme nous allons le dire, des sulfates de baryte, strontiane, chaux, soude, potasse, etc., d'autant plus abondants à teneur originelle égale qu'ils sont moins solubles. D'énormes masses de sulfures métalliques divers ont été certainement oxydées pendant la destruction des anciennes chaînes montagneuses; nous trouvons sur place, en abondance, des carbonates métalliques qui en résultent; mais les sulfates, qui auraient dû s'y associer, sont relativement rares; on a ainsi la preuve qu'ils sont descendus vers la mer.

Du principal de ces sulfates solubles, celui de chaux, à la fois assez soluble pour avoir formé des dissolutions et assez peu soluble pour s'en être reprécipité le premier, sont dérivés, par une réduction toute superficielle, les grands gisements de soufre natifs en solfates (Sicile, Louisiane, etc.), dont il va être question plus loin.

Evidemment, avant d'aller plus loin, on pourrait encore imaginer une phase inverse du cycle, où les sulfates de la mer et des gisements gypseux auraient été incorporés par pénétration aqueuse ou par refusion dans les roches cristallines et auraient contribué à les enrichir en pyrite. Un tel phénomène a dû se produire. Il n'en reste pas moins vraisemblable que le soufre a son origine principale à une certaine profondeur sous les silicates, comme pouvait le faire supposer son poids atomique, sauf à s'être dès le début répandu par diffusion dans cette écorce silicatée.

On trouve, en effet, le soufre profond abondamment développé sous la forme de sulfures métalliques, d'où dérivent les sulfates, qui, avec le soufre natif, leur produit accessoire, sont, pour le soufre, la seule forme véritablement superficielle.

Si l'on examine maintenant comment se présentent les divers sulfates, on voit que les sulfates peu solubles de métaux comme le plomb et le zinc existent seulement à l'état de traces parmi les produits d'altération superficiels des filons. Les sulfates de fer et de cuivre, plus solubles, ont dû se former plus abondamment; mais le sulfate de fer s'est presque toujours reprécipité par oxydation en peroxyde; le sulfate de cuivre, trop soluble, est descendu jusqu'à la mer, où ses faibles traces se sont perdues, sauf à donner auparavant par accident, dans quelque pays désertique, des gisements de couperose comme il en existe au Chili. On ne commence à trouver avec l'abondance d'un produit industriel que les sulfates des métaux alcalino-terreux et alcalins. Le plus insoluble de ceux-ci, le sulfate de baryte, pose un problème géologique, sur lequel nous aurons à revenir. Il n'est pas assez insoluble pour n'avoir pas été remis en mou-

vement, comme le prouve sa cristallisation par pseudomorphose sur des fossiles. Beaucoup des filons barytiques se présentent, dès lors, avec le caractère de remplissages venus par en haut et disparaissant avec la profondeur : la baryte étant supposée empruntée aux feldspaths barytiques¹. D'autres, cependant, paraissent avoir une origine profonde et on ne sait pas exactement à quel moment ni sous quelle forme le soufre s'y est introduit et s'il faut y assimiler le baryum au plomb et au zinc, comme ayant pu monter à l'état de sulfure, ou si un autre sel, tel qu'un chlorure de baryum, a été précipité par la rencontre d'un principe sulfuré.

Avec le sulfate de chaux, le problème devient plus clair. Tout le sulfate de chaux, même celui que l'on peut trouver dans certains filons, a une origine secondaire et superficielle presque incontestable. S'il n'est pas simplement pris à une solution sulfatée de chaux venant de la surface, il s'est produit par la réaction très simple et très manifeste d'un sulfate métallique dû à l'oxydation des sulfures de zinc, plomb, fer, cuivre, etc., sur des terrains calcaires. Dans les eaux, le sulfate de chaux est presque constant ; lors de leur évaporation, il est le premier à se reprecipiter ; aussi ses gisements géologiques doivent-ils être et sont-ils abondants.

Quant aux sulfates alcalins, leur solubilité trop grande fait qu'on les trouve à peu près exclusivement dans les eaux, sauf en quelques régions désertiques exceptionnelles, ou sauf dans des cas où la combinaison avec un sulfate peu soluble de chaux a facilité leur dépôt, comme dans la cristallisation de la glauberite.

Enfin, l'abondance des sulfates dans les eaux a naturellement pour conséquence leur réduction facile par les matières organiques, les boues, etc., et la production de sulfures, d'hydrogène sulfuré, ou même de soufre, parfois utilisés en thérapeutique. D'autre part, le soufre passe dans l'activité organique ; on le retrouve dans les huiles de crucifères, les productions épidermiques, les albuminoïdes ; certaines bactéries et plusieurs algues en renferment à l'état de liberté² dans leur protoplasme et, pour se le procurer, décomposent les eaux sulfureuses.

D'après ce qui précède, nous n'avons pratiquement à examiner, comme minerais de soufre, que : **A.** les gisements de soufre natifs, divisés eux-mêmes en trois groupes, 1° solfatares volcaniques d'importance insignifiante ; 2° filons de soufre ; 3° solfatares, ou calcaires tertiaires imprégnés de soufre, et **B.** les pyrites de fer, ou, accessoirement, les pyrites de fer cuivreuses et les blendes³, comprenant, 1° les filons pyriteux, 2° les amas pyriteux lenticulaires.

A. — GISEMENTS DE SOUFRE NATIF

1° SOLFATARES

Les volcans dégagent, à la fin des éruptions, des fumerolles d'hydrogène sulfuré et d'acide carbonique ayant une température d'à peine 100°

¹ Voir 1897. L. DE LAUNAY. *Contr. à l'étude des gîtes métal.* (Ann. d. M., p. 50).

² WINOGRADSKY. *Beitr. zur Morphol. der Bacterien.*

³ 1911. O. STUTZER. *Die wichtigsten Nitch Erze*, p. 184 à 264.

qui, en présence de la vapeur d'eau et des laves chaudes, s'oxydent à l'air avec formation d'acide sulfureux. Il se dépose alors, avec attaque des roches voisines, du soufre en efflorescences généralement peu abondantes, mais offrant ce caractère favorable de se renouveler. Dans certains cas, la roche poreuse, imprégnée de soufre dans toute sa masse sur une certaine étendue, finit par constituer de petits gisements d'une certaine importance. Le soufre des volcans a dû être une des plus anciennes sources de cette substance ; mais il ne compte plus aujourd'hui pour rien, et c'est plutôt à titre de curiosités que nous allons en citer quelques exemples.

Popocatepelt (Mexique)¹. — Entre les nombreux volcans du Mexique, le Popocatepelt est célèbre pour ses gisements de soufre, où, dès 1518, les soldats de Fernand Cortez allèrent puiser pour renouveler leur poudre.

Les dépôts, dont on évalue la formation journalière à près d'une tonne, ont toujours donné lieu à une petite exploitation rudimentaire, mais que la situation du gisement ne permet pas de développer. Il faut, en effet, commencer par gravir le volcan qui a 5 410 m., puis s'enfoncer de 92 m. dans le cratère au moyen d'un câble, descendre encore une rampe de 600 m. sur une pente de 0,30 par m. et, alors seulement, on trouve les dépôts de soufre près des orifices de vapeur, ou respiradores, sur un plateau horizontal.

Islande². — Il existe, en Islande, dans la région volcanique de Reykjald au Nord de l'île, un certain nombre de solfatares formées par une petite éminence, au centre de laquelle se dégagent des vapeurs sulfureuses, qui déposent une croûte de soufre à la surface. Ce soufre est en quantités assez fortes pour qu'on l'utilise.

Japon. — Au Japon, on a un moment exporté jusqu'à 25 000 t. de soufre à destination des Etats-Unis ; en 1908, la production a été encore de 28 000 t. de minerai à environ 40 p. 100. La principale mine est au N.-E. d'Hokkaido, à Atosanobori, où le soufre imprègne, autour d'un ancien cratère, des roches décomposées donnant moitié de minerai à 50 p. 100.

Etats-Unis. — Aux Etats-Unis, on a également exploité quelques solfatares (Sulphur Bank en Californie, Cove Creek dans l'Utah, etc.)

Chili. — A 10 km. W. de Santa Rosa de Pastos Grandes, à plus de 5 000 m. d'altitude, sur la montagne volcanique dite Cerro Azufre, on trouve abondamment du soufre avec de petits cristaux de gypse. Le soufre, assez fréquent dans la cordillère des Andes (département de Taltal) entre 3 500 et 4 000 m. sur les volcans éteints, a été l'objet d'une tentative d'exploitation malheureuse en 1901.

Gisements divers³. — On peut encore citer, comme ayant donné lieu à de petites exploitations, les solfatares de *Viterbe* près du lac Bolsène en Italie,

¹ *Le Mexique au début du xx^e siècle*, p. 290. — 1895. AUGUIERA et ORDONVEZ. *Expédition. al Popocatepelt* (Com. geol. Mex. Mexico 48 p. ; C. R. Z. f. pr. G., 1897, 392).

² 1879. GASCOGNE. *Les dépôts de soufre d'Islande* (Engin., t. 28, p. 89).

³ 1840. SAINTE-CAIRE DEVILLE. *Sur le gisement de soufre à la soufrière de la Guadeloupe* (B. S. G. E., 2^e, t. 4, p. 428). — 1897. LACROIX. *Minéralogie de la France*, t. 2, p. 367.

celles de la *Guadeloupe* (près la Basse-Terre), de certaines îles du *Pacifique*, de *Madagascar*, près Antsirabé, etc.

Dans les îles du *Pacifique*, à l'Est de l'Australie, notamment à Vanua Lava, on a signalé des dépôts de soufre, auxquels on a attribué des cubes considérables¹.

2° FILONS DE SOUFRE DE LA SIERRA DE BANDERAS (MEXIQUE)²

Il existe, au Nord du Mexique, dans la Bolson de Mapimi, des gisements de soufre assez particuliers, qui ont été décrits comme des filons de dépôt hydrothermal. La région est formée surtout de calcaires à rudistes appartenant au crétacé moyen, au milieu desquels on a exploité un moment des filons transversaux à la stratification, filons très irréguliers passant d'une simple crevasse à une véritable grotte, dans lesquels le soufre s'accompagnait de gypse et de silice.

Pour les auteurs qui ont étudié le gisement, c'est un cas de gypse épigénétique produit par des eaux thermales contenant de l'hydrogène sulfuré.

La coupe d'un tel filon présente, sur les deux épontes, du gypse pur; puis des zones de silice impure mélangée de soufre, et souvent, dans l'axe, du soufre cristallisé, ou cryptocristallin, avec géodes à beaux cristaux.

La formation de ce soufre cristallisé paraît résulter nettement d'une réaction postérieure ou secondaire, d'une décomposition d'hydrogène sulfuré et d'acide sulfureux se dégageant à l'état gazeux comme dans les solfatares. On a, dès lors, supposé une première phase, où des eaux thermales à hydrogène sulfuré auraient donné du sulfure de calcium et, en même temps, par oxydation, du gypse, avec déplacement de silice empruntée à la décomposition du calcaire; puis une seconde phase, dans laquelle ces eaux thermales auraient baissé et les gaz sulfurés auraient donné le soufre cristallisé des géodes.

Il est à remarquer que les roches éruptives sont relativement rares dans cette région et que leur intervention n'est pas probable. Par contre, on ne saurait oublier que des lits d'argile marneuse associés au calcaire contiennent des couches de gypse sédimentaire, en sorte que la tectonique des gisements demanderait peut-être à être examinée de près. Si l'on s'en tient aux observations des géologues locaux, on peut comparer ce gîte avec certaines sources thermales à hydrogène sulfuré sortant de véritables grottes dans le Caucase. Et ce mode de formation du soufre par eaux thermales peut être à retenir quand nous étudierons bientôt certains cas particuliers des gisements de Sicile.

3° SOUFRE DES TERRAINS GÉOLOGIQUES, — SOLFARES

La presque totalité du soufre natif vient de terrains géologiques, généralement tertiaires, mais pouvant par exception être plus anciens, où des solutions gypseuses se sont trouvées réduites par des influences hydrocar-

¹ *Mining Journal*, 26 déc. 1896.

² 1906. E. BÖSE. *Mines de soufre de la Sierra de Banderas* (Livret-guide du Congrès géologique au Mexique). — 1908. VILLARELLO. *Geol. química de los criaderos de azufre de Mapimi* (Durango) (Mém. Soc. Alzate, t. 26, p. 30).

burées incomplètement dé mêlées et où il s'est, en conséquence, déposé du soufre mélangé avec du calcaire sous forme de calcaires solifères : le tout ayant pu subir ultérieurement une altération et une remise en mouvement plus ou moins accentuées. On trouve donc ces gisements de soufre associés avec des formations gypso-salines, qui se sont développées dans certaines zones de l'écorce où les plissements tectoniques avaient créé des bas-fonds sans écoulement sous un climat désertique, et, spécialement, dans les périodes géologiques où ces formations gypso-salines sont elles-mêmes le plus produites : soit, en Europe, le permien-trias et le tertiaire. Nous citerons simplement, pour montrer la généralité du phénomène, un cas, sans importance industrielle, de soufre permien en Russie et nous insisterons ensuite sur les grands gisements mondiaux de la Sicile, de la Romagne et de la Louisiane, qui sont tertiaires, en terminant brièvement par quelques autres du même âge (Espagne, Grèce, etc.).

A) SOUFRE PERMIEN DE RUSSIE¹

On rencontre, en divers points, sur les bords de la Volga, des marnes gypseuses du permien ayant donné lieu à des veines de soufre. Certaines d'entre elles sont accompagnées d'une concentration de strontium en célestine, que nous allons retrouver en Sicile (Tzarevitchina, à l'angle N.-W. de la Samarskaïa Louka).

B) SOUFRE DE SICILE (pontien)²

Disposition géographique. — La chaîne centrale, qui parcourt la Sicile depuis Messine jusqu'à Marsala est dirigée à environ 75°. Les gisements solifères se trouvent presque tous au Sud de cette chaîne centrale, sauf

¹ 1878. *Aperçu des richesses minérales de la Russie.*

² 1846. DE Cussy. *Sur les mines de soufre en Sicile* (B. S. G. F., 2^e, t. 4, p. 82). — 1853. VILANOVA. *Sur l'âge tertiaire du gisement de soufre de la Sicile* (B. S. G. F., 2^e, t. 2, p. 82). — 1861. LA BRETOGNE et DE RECHTER. *Industrie solfifère en Sicile* (Palerme). — 1867. *Mines de soufre de la province de Caltanissetta* (Sicile) (Bull. Ann. des M., t. 17, p. 57). — 1870. MOTTURA. *Sulla formazione solfifera della Sicilia* (Torino). — 1871. MOTTURA. *Sulla formazione terziaria nella zona solfifera della Sicilia* (Firenze). — 1873. PARODI. *Sull'estrazione dello zolfo in Sicilia* (Rel. al. Min. d'Agr.). — 1874. PIRCKEY. *Procédés d'extraction du soufre en Italie* (Ind. min., 2^e, t. 2, p. 609 et 825). — 1875. CH. LEBOUX. *Sur les mines de soufre en Sicile* (Ann. des M., 7^e, t. 7, p. 1). — 1875. FABRI. *Mem. sulle miniere di solfo di Lercara* — 1875. G. BRUZZO. *Les mines de soufre de Lercara en Sicile* (Cuyper, t. 38, p. 567). — 1879. VON LASAULX. *Schwefel Districten in Sicilien* (N. J. Min.). — 1881. MOTTURA. *Formation solfifère de la Sicile* (Ind. Min., 2^e, t. 10, p. 147). — 1887. RICCARDO TRAVAGLIA. *La crisi solfifera in Italia.* — 1888. *La crise du soufre en Sicile* (Cuyper, t. I, p. 303). — 1890. FRIEDEL. *Journal de voyage inédit à l'Ecole des Mines* (n° 894). — 1890. CONTI. *Not. sulle cond. gen. dell' industria del solfo* (Ann. di Agricoltura, n° 170). — 1892. SPEZIA. *Sull'origine del Zolfo nei giacimenti della Sicilia* (Torino, chez Candeletti, 30 p. in-8°). — 1897. AICHINO. *Lo zolfo* (Encycl. delle arti e industrie), avec longue bibliographie. — 1897. GOUNOT. *Contr. à l'étude de la form. du soufre de Sicile* (Palerme, Vizzi, 56 p.). — 1900. PELLATI. *Sur le trait. des minerais de soufre en Sicile* (B. S. Ind. Min., t. 14, p. 1283-1375). — 1906. STELLA. *Mikrosk. Fossilien in den Schwefellagern Italiens* (Oest. Z. f. B. u. H., p. 160). — 1908. *Sicilian Sulphur Industry* (Min. Journ., 27 juin). — Coll. Ecole des Mines, 1744, 1782 et 1783.

le petit bassin de Lercara, dans la province de Palerme, au Nord de la chaîne (fig. 16).

Ils sont particulièrement connus le long de la ligne de Catane à Caltani-

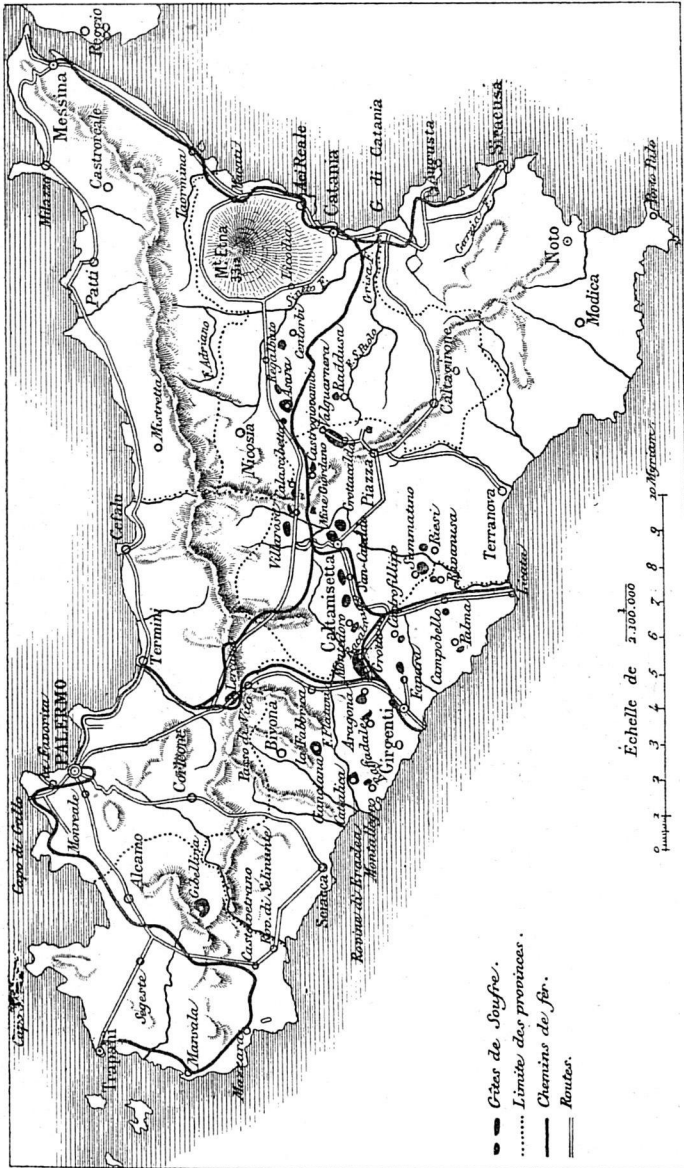


Fig. 16. — (carte des gisements de soufre de Sicile.)

setta et Girgenti. La plus grande largeur de la zone solfifère, de Licata à Nicosia, est de 90 km. ; sa longueur d'environ 160 km.

Les principaux de ces gisements sont : Lercara, Racalmuto, Caltanissetta, Grottafalda, Muglia, Sommatino, Aragona, Madore, Gibellina, etc.

Géologie générale. — Il existe, en Silice et en Calabre, divers gisements de soufre qui se rattachent tous à la formation sulfo-gypseuse associée aux couches à congéries, dont l'âge est pontien, c'est-à-dire miocène tout à fait supérieur.

La coupe générale des terrains est la suivante en Sicile :

Pliocène	{	sicilien. (56) astien . (55)	Marnes, sables et grès, calcaires à foraminifères dits <i>trubi</i> .
Miocène supérieur	}	pontien (53)	Formation sulfo-gypseuse avec calcaire imprégné de <i>Soufre, Tuft</i> (argiles noires schisteuses) et <i>Arenazzoli</i> (grès fins micacés). <i>Tripoli</i> et marnes siliceuses farineuses, feuilletées, avec diatomées, poissons marins et d'eau douce, et <i>lignites</i> (étage à caractère lacustre dominant).
		sarmatien (52)	Bancs d'argile plus ou moins <i>bitumineux</i> intercalés. Calcaire marneux des environs de Syracuse (probablement équivalent des tripolis précédents) avec <i>Mactra Podolica</i> .
		tortonien (51)	Marne sableuse et salée avec <i>amas de sel gemme</i> , macalubes, etc., (étage d'évaporation lagunaire).

Cette série stratigraphique implique : une première phase d'évaporation marquée par le sel sarmatien ; puis des dépôts lacustres ou saumâtres caractérisés par la présence des tripolis, lignites et bitumes, dont les hydrocarbures, déplacés, ont pu contribuer plus tard à la réduction du gypse ; enfin une phase d'évaporation, où se sont formées les argiles noires (*tufi*), les grès fins, et les gypses avec calcaires solifères ; après quoi sont revenues des formations marines à foraminifères (*trubi*).

Tous ces terrains sont très bouleversés. Les couches, parfois horizontales, sont le plus souvent fortement inclinées, verticales ou même renversées. Cependant on doit noter qu'aucun épanchement lavique ne s'est produit pendant le dépôt des terrains solifères. Il est donc difficile de chercher une relation (même très indirecte) entre les phénomènes internes et la formation du soufre. Aussi la théorie volcanique de ces gisements, qui a été un moment soutenue par de nombreux auteurs, est-elle généralement abandonnée.

La coupe ci-jointe (fig. 17), prise à l'Est de Caltanissetta, montre l'éocène (*a*) apparaissant à la voûte anticlinale, au Monte Marcenita. Des deux côtés sont deux plaines ondulées formées par les marnes et gypses, donnant par suite deux bandes solifères parallèles (*i*) ; et le pliocène forme, surtout au Sud, une grande crête qui domine constamment la ligne du chemin de fer du Caltanissetta à Catane. On peut remarquer qu'au Sud, c'est-à-dire là où se trouve l'important district minier de Caltanissetta, les tripolis et les *trubi* manquent. Il arrive souvent ainsi qu'un ou plusieurs termes de la série n'existent pas. Les gypses et les calcaires accompagnent seuls le soufre d'une façon constante.

Minerais de soufre. — Lorsqu'on examine en détail une région solfifère, on voit d'abord, à la base du gypse, une ou plusieurs couches de calcaire pénétré de soufre: couches très étendues et régulières, mais peu puissantes et pauvres. Au-dessus, toujours dans la formation gypseuse, le

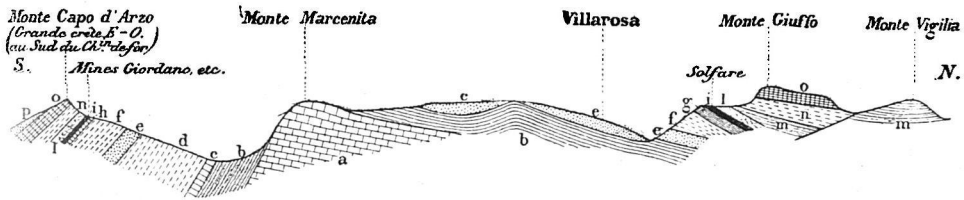


Fig. 17. — Coupe N.-S. du mont Capo d'Arzo au mont Viglia, au 1/50000° pour les longueurs, au 1/25000° pour les hauteurs.

a. Calcaire éocène sup. — b. Grès et argiles ferrugineuses (miocène infér.). — c. Calcaire concrétionné (miocène inf.). — d. Marnes et argiles salifères. — e. Grès et conglomérats (miocène moyen). — f. Marne. — g. Tripoli (miocène supér.). — h. Calcaire siliceux. — i. Minéral de soufre. — l. Gypse. — m. Truffi. — n. Marnes pliocènes. — o. Tufs calcaires pliocènes. — p. Grès et conglomérats (pliocène sup.).

soufre constitue une série d'amas beaucoup plus restreints, irréguliers et indépendants les uns des autres, mais puissants et riches.

Au mur de l'ensemble, est le calcaire stérile, le tufo, ou souvent encore directement le tripoli. Puis, la zone exploitée comprend, en général, à sa base, plusieurs couches (qui n'ont jamais moins d'un mètre de puissance, sans quoi on les négligerait) séparées par des *partimenti* (lits stériles de calcaires, de marnes ou de tufi). Dans la partie supérieure, on a des amas riches situés dans le gypse, presque toujours avec intercalation de tufi. Enfin, au toit, est le gypse, avec ou sans interposition de calcaire stérile ou de tufo. Nous donnerons plus loin, pour préciser, les coupes de diverses exploitations.

Le soufre est presque toujours amorphe, sauf dans les géodes, ordinairement d'un jaune brun et d'aspect résineux, quelquefois jaune et légèrement translucide. Il n'imprègne pas, à proprement parler, le calcaire d'une façon

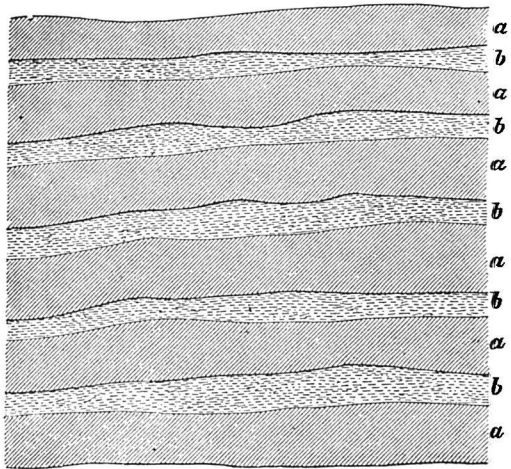


Fig. 18. — Type de minéral zoné, formé d'alternances de calcaire faiblement solfifère (a) et de soufre légèrement calcarifère (b); d'après Motura.

intime, mais s'y trouve presque toujours en petites veinules traversant les strates, en noyaux, en lentilles, assez difficiles à expliquer, si l'on admet, comme cela semble résulter de toutes les autres observations, la précipitation simultanée du calcaire et du soufre (fig. 18 et 19). Aux affleu-

rements, le calcaire solfifère a perdu son soufre par dissolution et il reste des

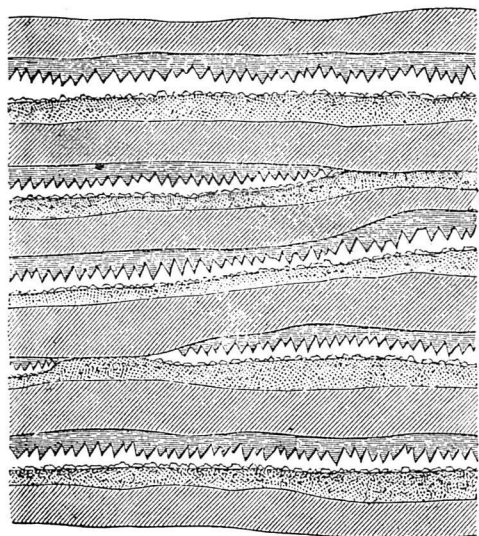


Fig. 19. — Type de minerai zoné, formé de calcaire pur solfifère (a) et de soufre (b), avec calcaire cristallin (c), dont les cristaux ont la pointe en bas. Entre b et c, il y a un espace vide. Le soufre, à la partie supérieure de b, est cristallisé en cristaux présentant leur pointe vers le haut. L'épaisseur des veinules va de 5 mm à 3 cent. (d'après Mottura).

bancs corrodés avec rares infiltrations siliceuses, que l'on appelle, soit le *briscale*, soit le calcaire siliceux. Ces bancs, mis en saillie par les érosions, sont très caractéristiques dans la région solfifère.

Le *minerai* proprement dit de soufre est un calcaire qui contient de 8 à 40 p. 100 de soufre; au-dessous de 8 p. 100, on le rejette comme stérile; au-dessus de 40 p. 100, il est considéré comme soufre natif plus ou moins impur¹. Une trop forte proportion de gypse est une gêne pour le traitement par fusion. La teneur moyenne de tous les minerais est, d'après Mottura, de 24 p. 100: ce qui, a-t-on remarqué, se trouve être le rapport des équivalents du soufre et du carbonate de chaux. De 8 à 16 p. 100, le minerai est pauvre; de 16 à 24, bon; de 24 à 40, riche ou très riche. A Madore (Lercara), on compte 20 p. 100; à

¹ Les épaisseurs sont, dans les différentes mines, les suivantes :

MINE DE MADORE

	(Épaisseur.)
Couche Zagareddada (rubanée)	8 m.
Argile schisteuse noirâtre	1,50 m à 2 m.
Couche Perculatella (nids de soufre dans le calcaire).	2 m. à 2,5 m.
Argile.	2 m. à 4 m.
Couche Perculatella grande.	4 m. à 6 m.
Argile.	5 m. à 6 m.
Couche Orlando.	2 m. à 6 m.
Gypse	» »
Total.	24,50 m. à 34,50 m.

MINE DE CIMICIA (Racalmuto).

Veine <i>di Sopra</i> ou blanche.	1 m. à 4 m.
Argile grise	1 m. à 2 m.
Veine <i>arena rollata</i> (un peu bitumineuse).	1 m. à 5 m.
Total.	3 m. à 11 m.

Callanisetta, épaisseur moyenne : 4 mètres.

Grottacalda, 12 mètres en 3 bancs, séparés par des lits de marne de 1 mètre à 1,50 m.

Sommatino, 30 à 35 mètres, divisés en 6 bancs de 2 à 8 mètres.

Croce, amas de plus de 35 mètres sans stérile intercalé.

Grottacalda, 25 à 27 ; à Sommatino, 18 à 26 ; à Cimicia (Racalmuto), 21 p. 100, etc.¹

Le terrain solfifère contient, de plus, en abondance des pétroles, bitumes, asphaltes et gaz carburés ; les explosions de grisou sont même un des dangers de l'exploitation. Dans certaines mines comme Giona, le bitume coule partout dans les galeries. C'est un point sur lequel nous aurons à revenir en parlant de l'origine du soufre.

Les recherches en Sicile ne sont dirigées par aucune idée théorique ; on s'est presque toujours contenté de partir des affleurements par des galeries en inclinaison en s'arrêtant au premier accident ou *ammuratura*. Quand le soufre n'affleure pas, on n'a aucun indice. Le *briscate*, calcaire carié et corrodé que les Siliciens considèrent comme un signe de minerai, n'est que le calcaire solfifère lui-même, dont le soufre a été enlevé par l'action oxy-

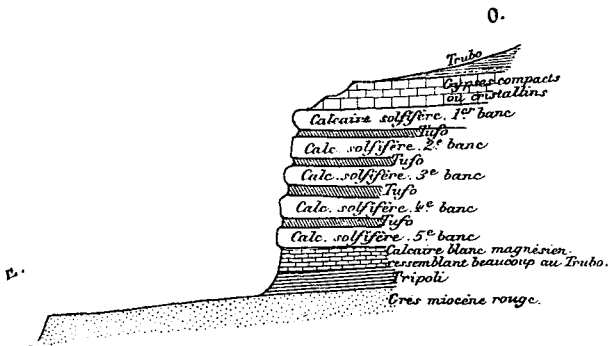


Fig. 20. — Coupe prise à l'Est du bassin de Muglia.

dante des eaux au voisinage des affleurements ; les sources sulfureuses n'annoncent pas toujours le soufre, mais souvent les gypses traversés par des émanations carburées ; le calcaire seul peut renseigner, car il constitue le gisement au même titre que le soufre et l'on passe de l'un à l'autre par transitions insensibles.

Nous compléterons ces données générales par la description plus spéciale de quelques solfaires.

Solfare Giordano. — L'emplacement de la solfatare *Giordano*, au voisinage de Caltanissetta, est figuré sur la coupe donnée plus haut (fig. 17). On y exploite une couche unique inclinée à 35°, dont l'épaisseur varie de 1 à 4 mètres. Au-dessus, dans les gypses, se trouvent des amas qu'on néglige. Cette couche, qui se prolonge sur plusieurs kilomètres, alimente un grand nombre de solfaires. Celle de Giordano compte 5 à 600 m. de longueur en direction. Elle a un puits de 160 m. de profondeur et passe pour l'une des plus perfectionnées comme installation. Sa production est d'environ 15 000 t. de soufre par an.

¹ Nous verrons plus tard, en Louisiane, la teneur moyenne du soufre atteindre 70 p. 100 : ce qui ne permet plus d'attacher à ce rapport de 24 p. 100 l'importance théorique qu'on lui avait attribuée autrefois.

Solfare Muglia. — La solfatare de *Muglia* est située presque au pied de l'Etna sur un petit bassin circulaire isolé de 1500 à 2000 m. de diamètre. On y exploite séparément cinq couches régulières d'une puissance totale de 20 m., qui fournissent 13 000 t. de soufre par an et occupent 860

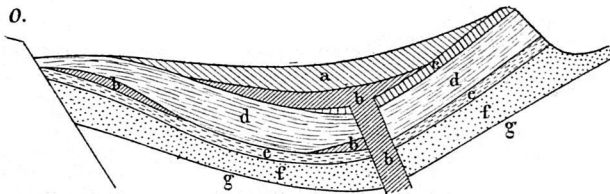


Fig. 21. — Coupe E.-W. du bassin de Muglia.

a. Trubi. — b. Argiles noires schisteuses (tufi). — c. Gypses. — d. Calcaires solifères et tufi. — e. Tripoli. — f. Grès inférieurs. — g. Marnes miocènes.

ouvriers. Le minerai est une imprégnation dans un calcaire gris coupé de veines d'argile noire luisante (tufi).

Les deux figures 20 et 21 montrent la disposition du gîte.

Solfare Virdilio. — A *Virdilio*, près Licata, le gisement est formé d'une grande lentille allongée de 800 m. de long, 30 à 70 m. de large, 15 m. de

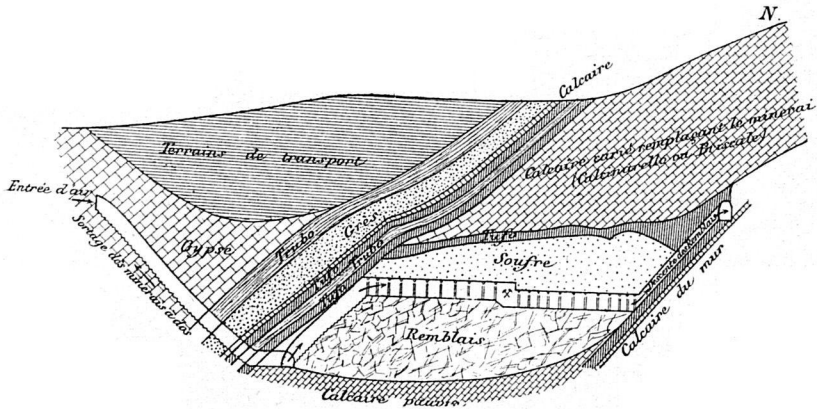


Fig. 22. — Coupe N.-S. de la solfatare Virdilio.

puissance, inclinée à 25° ou 30° vers le Sud (fig. 22). On y obtient du soufre très pur ; la production, est de 17 à 18 000 t. par an.

Solfare Giona. — *Giona* est la solfatare la plus importante du district de Racalmuto (près Girgenti). Sa production est de 10 000 t. par an. Le gisement se compose d'une couche de calcaire compact à veines de soufre de 2 à 4 m de puissance, presque verticale et disloquée par des failles. La longueur de l'affleurement est de 1 000 m. Un peu plus à l'Ouest, c'est-à-dire au toit, on exploite un magnifique amas de soufre pur en grands cristaux dans le gypse.

Cette mine est célèbre par les beaux cristaux de soufre, de célestine, calcite et aragonite qu'on y trouve ; c'est le seul gisement connu de mélanophlogite. On doit noter, en outre, que le bitume y est assez abondant pour couler dans les galeries.

Origine des gites de soufre de Sicile. — L'origine sédimentaire du soufre de Sicile paraît hors de doute. Son existence dans un niveau absolument constant, alors qu'il n'y en a pas trace dans les autres couches de la région, l'existence de quelques fossiles (rares, il est vrai), l'étendue des gisements en sont des preuves. On peut ajouter que le soufre n'est qu'un accident au milieu de la formation des gypses.

Travaglia, ayant remarqué l'absence de tout dépôt de sables, ou terrains de transport, à l'exception de quelques argiles bitumineuses (tufi), dans l'étage solfifère et gypseux, en a conclu de plus qu'à l'époque où ce gypse s'est déposé, les précipitations atmosphériques devaient être très rares, le climat très sec : ce qui avait pu amener une évaporation d'eau salée. Il a retrouvé de même la trace de ce phénomène dans une couche mince d'oxyde de fer mélangé de calcaire à la base du gypse : couche analogue à celle qui se forme d'abord dans une eau de mer en train de se concentrer.

Dès lors, on peut admettre que ce gypse, aussi bien que le sel mélangé à des argiles qu'on rencontre à un niveau inférieur, est le résultat de la concentration de grandes lagunes désertiques ou marines, isolées peut-être par un premier mouvement de plissement. Quant au soufre, il proviendrait très simplement de la réduction locale du sulfate de chaux par des hydrocarbures : réduction qui donne d'abord du sulfure de calcium, puis, au contact de l'air, un premier précipité de carbonate de chaux avec de l'hydrogène sulfuré formant aussitôt un polysulfure, le polysulfure à son tour produisant un précipité de soufre et de carbonate de chaux. Une partie du calcaire serait alors considérée comme un précipité chimique connexe du soufre : ce qui n'exclut pas la possibilité de sédiments calcaires normaux venant, comme cela arrive dans la plupart des bassins gypseux, s'intercaler, avec leurs restes organisés, dans l'ensemble de la formation.

La présence des hydrocarbures invoqués dans cette hypothèse est suffisamment prouvée par les bitumes et gaz carburés, rencontrés un peu partout avec le soufre. On a pu même parfois découvrir en quelque sorte la fente par laquelle étaient arrivés les hydrocarbures. Ainsi, à San Giovanniello (près Castel Termini). On a commencé par suivre, à 120 m. de profondeur, une fente irrégulière tapissée de cristaux de soufre au milieu du gypse et cette fente a conduit à un gros amas de soufre riche de 30 m. d'épaisseur, 60 m. de largeur, 17 m. de hauteur, dont elle occupait le centre. Un fait analogue s'est reproduit à Giona (Racalmuto).

Reste seulement à expliquer l'origine des hydrocarbures. Pour Mottura et Baldacci, ce sont les produits de macalubes ou volcans de boue, analogues à ceux qu'on voit encore près de Girgenti et de Caltanissetta ; pour Travaglia, de simples concentrations de matières organiques (il y a quelques poissons dans le miocène moyen et des restes organisés dans le tripoli).

Suivant ce dernier, le dépôt de matières organiques au fond du bassin serait antérieur à la précipitation du gypse et aurait commencé par réduire celui-ci d'une façon régulière : d'où les couches continues de la base. Puis, ce dépôt organique étant recouvert par les premiers précipités, le gypse se serait stratifié à son tour et n'aurait plus été décomposé que localement par des hydrocarbures montant du fond suivant quelques fissures.

Un petit fait secondaire mérite qu'on s'y arrête un instant, c'est la concentration de la strontiane parallèlement au gypse : phénomène très accentué en Sicile, mais qui se retrouve également dans d'autres gisements de soufre, aux Tapets, en Romagne, sur la Volga, dans le Daghestan, etc. Ce n'est pas seulement dans les géodes de soufre natif que l'on trouve les cristallisations connues de célestine : mais le calcaire solfifère lui-même renferme une teneur notable de strontiane¹. La célestine est développée dans le soufre même, où elle est parfois assez abondante pour qu'on ait pu songer à l'exploiter. Au contraire, le carbonate de strontiane (strontianite) est rare dans le minerai et ne semble guère exister que lorsque celui-ci est riche en veines d'opale. Mais ce carbonate de strontiane devient très abondant par endroits dans un banc calcaire stérile qui s'étend sur de grandes longueurs, et, d'après Gounot, les trois-quarts des échantillons de ce calcaire en renferment une quantité très sensible. Cette présence de la strontiane peut être rapproché du fait, constaté par Dieulafait, que ce corps se concentre en fortes proportions dans le gypse résultant de l'évaporation de l'eau de mer. D'autre part, dans les marnes de Meudon, on sait qu'il existe de nombreuses veinules strontianifères. A Ahlen, en Westphalie, comme nous le verrons mieux au chapitre du strontium, on exploite des filons de carbonate de strontiane dans des argiles marneuses du même âge géologique. Au Mokattam, en Egypte, le Neve Forster a trouvé des cristaux de célestine englobant des nummulites. On peut donc supposer que le strontium, existant, pour une cause quelconque, dans l'eau de mer, s'est rassemblé, sous forme de sulfate dans le gypse, de carbonate dans le banc calcaire et qu'il a été déplacé par une réaction connexe de celle qui a formé le soufre. Des recristallisations secondaires ont pu intervenir. Il est assez curieux que la baryte, élément si analogue à la strontiane, fasse défaut dans les gisements siciliens.

A cette théorie générale des gisements de soufre siciliens, qui n'est pas, il faut le reconnaître, sans soulever beaucoup de difficultés de détail, on a fait quelques objections, dont beaucoup disparaîtraient peut-être, si l'on analysait mieux le rôle des phénomènes superficiels, des altérations secondaires et des remises en mouvement, qui a été visiblement très important dans ces gisements (notamment pour ce qui concerne les géodes de soufre cristallisé). Il y aurait lieu de rechercher si la réduction du gypse en soufre n'est pas, en partie, un phénomène postérieur dû à des circulations hydrocarbonées récentes à travers un terrain de gypse. Pour échapper à ces difficultés, quelques auteurs (Gounot, Spezia, etc.), ont, avec des formes diverses, repris une théorie analogue à l'ancienne

¹ Voir 1877. DIEULAFAIT (C. R., p. 1303 et t. 97, p. 51). — 1892. SPEZIA. *Sull' origine del zolfo*, etc., p. 56. — 1897. GOUNOT. *Formation du soufre de Sicile*. — 1897. L. DE LAUNAY. *Contrib. à l'étude des gîtes métall.*, p. 50. — Voir plus loin, au t. 2, p. 206 à 210.

hypothèse volcanique, d'après laquelle le rôle essentiel serait attribué à des sources thermales chargées d'hydrogène sulfuré arrivant dans le bassin de dépôt. Si le gisement de Sicile était unique dans le monde, on pourrait à la rigueur, admettre de semblables coïncidences compliquées; mais un phénomène aussi souvent renouvelé que celui des dépôts solifères sédimentaires demande, à notre avis, une explication simple, tirée des conditions mêmes de la sédimentation, telle que l'accumulation de matières organiques, suivie de la concentration des eaux gypseuses dans un même bassin.

Industrie¹. — L'industrie des mines de soufre en Sicile se trouve, depuis longtemps, pour des causes diverses, dans des conditions extrêmement difficiles, encore accrues, dans ces dernières années, par la concurrence croissante des gisements de la Louisiane, et le gouvernement italien, qui se débat contre un état de choses, auquel les mesures législatives ne peuvent remédier que très partiellement, a vainement multiplié les enquêtes parlementaires, ou fait les tentatives les plus aventureuses d'un socialisme d'État, fatalement voué d'avance à un échec qui ne s'est pas fait attendre*. Les perfectionnements industriels, dont nous allons dire un mot, ont été eux-mêmes insuffisants. Si intéressante que soit la question, nous ne pouvons en donner ici que les grandes lignes.

Le défaut des mines siciliennes est surtout l'ancienneté de leur exploitation, avec la grande division de la propriété qui a entraîné un mode de travail défectueux, resté, jusqu'à ces tout derniers temps, pareil à celui des mines de l'antiquité, manquant de capitaux, travaillant au hasard et sans plans. Dans cet ordre d'idées on a pu réaliser récemment un progrès, qui correspond d'ailleurs à l'évolution forcée de toute industrie amenée à se centraliser pour vivre. Le nombre des petites exploitations diminue, sans toutefois que le groupement soit aussi constamment progressif et rapide qu'on devrait le désirer.

En 1892, il y avait 657 exploitations occupant 33.000 ouvriers; en 1894, on était tombé à 487. En 1905, nous en retrouvons 777, qui, avec l'aggravation de la crise, descendent à 444 à la fin de 1908 (pour 26.000 ouvriers).

En 1908, sur une production totale de 413.530 t., 144.217 ont été produites par sept exploitations principales; mais il restait encore 323 petites mines donnant en tout 67.000 t.

En même temps, les méthodes de travail barbares sont peu à peu remplacées par des extractions mécaniques, qui permettent aux mines de s'enfoncer un peu plus (150 m. au delà de 100 m., quelques-unes jusqu'à 200 m.).

En 1908, il y avait, en Sicile, 47 puits d'extraction verticaux et 30 inclinés munis d'une extraction mécanique, contre 9 à moteurs animaux: le tout extrayant 1.544.000 t. de minerai, avec un prix de revient total d'environ 6 fr. par tonne, pour produire 266.000 t. de soufre (17 p. 100 de soufre en moyenne); soit 35 à 40 francs de frais relatifs à la mine par tonne de soufre produite.

¹ Voir pour les détails que nous sommes forcés de résumer la Bibliographie de la page 330, notamment notre article de la Grande Encyclopédie.

* Voir à ce sujet L. DE LAUNAY. *La conquête minérale*, p. 370.

Pour cette même année, la production de soufre a été : par piqueur, de 66,74 t. ; par ouvrier, de 15,83 t. ; l'ouvrier gagnant en moyenne 2,16 fr. par jour.

La méthode d'extraction du soufre s'améliore également. Le minerai étant en moyenne à moins de 20 p. 100 de soufre, il faut le fondre. Cette fusion, qui avait lieu récemment encore presque uniquement aux calcarones (cuisson analogue à celle du charbon de bois) a eu lieu, en 1908 : pour moitié par fours Gill, pour un quart par les appareils à vapeur et, pour un quart seulement, aux calcarones.

Le prix de revient de la fusion au calcarone est d'environ 4,50 fr. par tonne de soufre : mais le procédé ne s'applique qu'aux minerais riches à plus de 15 p. 100. En laissant de côté les impôts, redevances, etc., on arrive, pour le soufre vendu à bord, à un prix de 50 à 60 francs¹.

Un tiers du soufre sicilien est raffiné à Catane. Le reste est exporté à l'état brut.

Le *prix de vente*, comparé au prix de revient, constitue la grande difficulté. Ce prix, vers 1874, avait atteint 140 fr. la tonne ; en 1888, il était tombé à 70. En 1908, le soufre brut s'est relevé entre 90 ou 95 fr. la tonne (en moyenne 93,57 fr. contre 92,46 fr. en 1901) dans les ports d'embarquement italiens et le soufre sublimé a atteint 130 fr. ; mais on ne réussissait à en écouler à ce taux qu'une faible partie. Quelques chiffres montreront la manière dont la tentative de « valorisation », faite par le gouvernement italien, a réussi, comme c'est habituellement le résultat pour les essais anti-économiques de ce genre et malgré toutes les explications officielles qu'on a essayé d'en donner. Au 31 décembre 1900, le stock en Sicile était de 221.000 t., il a monté progressivement à 339.000 en 1902, 396.000 en 1904, 525.000 en 1906, 600.000 en 1908.

Nous avons déjà vu comment la concurrence de la Louisiane était la cause de ce malaise. Cette concurrence est devenue d'autant plus vive que les Américains, après avoir vendu seulement au début du soufre brut, se sont outillés, en 1908, pour produire aussi du soufre raffiné.

Vers 1890, Mottura avait essayé d'évaluer ce qui pouvait rester de soufre en Sicile. Suivant lui, on aurait extrait, jusqu'en 1830, 2 millions de tonnes ; de 1830 à 1888, 10.675.000 t., auxquelles il ajoute 5.000.000 t., perdues dans le traitement, et il en restait alors environ 49 millions, dont beaucoup, enfouies dans de mauvaises exploitations, ne pourront pas être reprises.

Depuis ce moment, on a extrait environ 8 millions de tonnes. Une évaluation nouvelle, faite en 1907, conduit à admettre qu'il peut rester 24 millions de tonnes de soufre utilisable, sous la forme de minerais ayant une teneur moyenne totale de 18 à 24 p. 100.

¹ La contribution pour le « consorzio » de vente est de 2,75 fr. par tonne, celle pour l'assurance des ouvriers de 1,50 fr., etc.

c) SOUFRE DE LA ROMAGNE, DES MARCHES ET DE L'AVELLINO

Les soufres de Romagne, des Marches et de l'Avellino sont d'une importance industrielle médiocre à côté des soufres siciliens. La production de la Romagne et des Marches est seulement (1908) de 25.100 t., soit moins du dixième de ce que produit la Sicile ; celle de la province de Naples (Avellino, Catanzaro) de 6.200 t. Mais, comme les gisements dont il va être question ensuite dans d'autres pays, ceux-là sont intéressants à mentionner parce qu'ils montrent la généralité de certains faits déjà signalés dans les gisements précédents.

En Romagne¹, près de Césena (entre Ravenne et Rimini), on exploite, au même niveau qu'en Sicile, dans le haut du miocène supérieur, des lentilles de soufre interstratifiées dans des marnes calcaires et gypseuses, superposées à des tripolis. La couche solfifère a une puissance moyenne de 1 à 4 m. Elle est accompagnée de gypses et argiles noires bitumeuses. A sa base est un calcaire siliceux, dit *Cagnino*, correspondant à celui de Sicile. Elle-même renferme des zones ou lentilles de soufre plus ou moins allongées, réparties en deux bancs principaux : puis viennent des gypses contenant encore des amas de soufre. Comme minéraux accessoires, on a de la sélénite en beaux cristaux, de la célestine et un peu de barytine.

On peut remarquer ici la présence de la barytine, dont l'absence à côté de la célestine a été signalée plus haut en Sicile. La silice est parfois assez abondante.

Dans l'Avellino (province de Naples), le soufre se trouve dans la vallée du Sabato, territoire de Tufo. Ce gisement, intercalé encore dans le miocène supérieur, a une épaisseur de 8 à 10 m. avec une teneur de 33 p. 100 qui le fait employer directement, après mouture, pour le soufrage des vignes.

En Calabre, on retrouve la même zone gypso-sulfureuse avec deux bancs solfifères séparés par une strate de gypse, le tout reposant sur le tripoli.

d) SOUFRE DE LA LOUISIANE²

Géologie. — Le gisement de soufre de la Louisiane, qui, en si peu d'années, a pris une importance comparable à celle des antiques gisements siciliens, est situé près de la petite ville de Lake Charles, dans la région littorale du golfe du Mexique nommée Gulf Coastal plain, presque à la frontière de la Louisiane et du Texas, à environ 300 km. de Galveston et

¹ 1865. C. PEEAZZI. *Le Soufre en Italie* (Ann. d. M., 6^e, t. 7, p. 303). — 1880. *La formazione gessoso solfifera e il secondo piano mediterraneo in Italia* (Pr. verb. d. Soc. tosc. di sc. nat., 14 nov.). — 1897. AICHINO. *loc. cit.*, p. 1135. — 1903. D. PANTANELLI. *Di alc. giac. solf. della prov. di Siena* (Bul. Ecr. Soc. Ital., t. 22). — 1904. L. BOMBICCI. *Descr. degl. esempl. di solfo*. (Mem. Ac. Bologna, 27 mai).

² 1906. L. BALDACCII. *Il giacimento solfifero della Louisiana* (Min. de l'Agric. Italien). — 1907. L. DE LAUNAY (SALLIOR) (*La Nature*, n° 1758, 2 fév.). — AGULLON, *Sur le syndical du soufre* (Ann. d. M., 1906, t. 10, p. 546 ; 1909, t. 16, p. 443 ; 1910, t. 18, p. 359).

OSCIENSIS
 JUSSEU
 1910
 10000

369 km. de la Nouvelle-Orléans, où se fait l'embarquement. Son âge géologique est tertiaire, comme celui des gîtes siciliens, sans qu'on ait exactement déterminé le niveau des sables de Lafayette auxquels on l'assimile. On retrouve la même association avec du gypse et avec des dégagements hydrocarburés; mais ceux-ci ont ici une importance tout autre, car le gîte de soufre est dans la grande région pétrolière du Texas, qui sera plus tard décrite. Par suite du mode d'exploitation très spécial (par sondages) employé dans ces mines, on n'a jamais touché le gisement en place. Néanmoins, on sait (fig. 23) qu'il se compose d'un banc de minerais à 70 ou 80 p. 100 pouvant avoir 80 m. d'épaisseur sur 500 m. de long et 500 m. de large : soit, au total, près de 40.000.000 t. C'est donc une sorte d'énorme bloc de soufre qui vient s'intercaler dans les couches gypseuses (e), sous 10 m. de calcaires caverneux (c) recouverts par 50 m. de sables aquifères (b). Une telle teneur en soufre ne permet plus de conserver

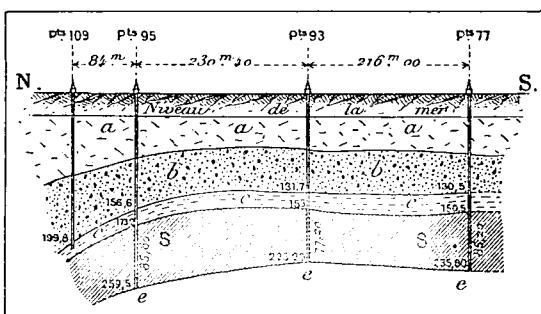


Fig. 23. — Coupe des gisements de soufre de Louisiane d'après Baldacci.

a, argile; b, sable aquifère; c, calcaire poreux; S, soufre; e, terrain gypseux et calcaire stérile.

intégralement la théorie précédemment exposée à propos de la Sicile, d'après laquelle la réduction du gypse doit aboutir (sauf concentration locale exceptionnelle) à une moyenne de 24 p. 100. Il est permis de se demander si les dégagements hydrocarburés si abondants qui se contiennent sous nos yeux n'ont pas contribué à la réduction récente du gypse.

Industrie. — Industriellement, le soufre a été découvert, par hasard, en 1870, dans la Louisiane; mais longtemps l'abondance des eaux superficielles a paralysé tous les efforts pour l'extraire directement, jusqu'au jour où l'on a eu l'idée hardie d'aller l'exploiter par fusion souterraine au fond de trous de sonde de 150 à 200 m. L'« Union Sulphur Cy » a, non sans peine, réalisé cette idée de Herman Frasch, et la production, qui a commencé en 1903, a rapidement dépassé 300.000 t. En principe, la méthode consiste à introduire, dans le trou de sonde, de la vapeur à 168° sous une pression de 7 atmosphères 1/2. Le soufre, fondant à 136°, se liquéfie tout autour du puits dans un rayon d'une trentaine de mètres et arrive liquide au jour pour s'épancher directement dans des réservoirs. On a vu un seul puits fournir plus de 37.000 t. : certains don-

nent couramment 300 à 400 t. par jour. La moyenne est de 289 t. Il est vrai, la dépense de force est assez considérable (2.400 chevaux par trou de sonde); mais, comme on est à proximité des pétroles du Texas qui reviennent à 15 fr. la tonne, avec un pouvoir calorifique équivalent à une fois et demie celui des charbons, la dépense correspondante se trouve réduite plus qu'elle ne le serait partout ailleurs. Le soufre, par suite de son mode d'extraction même, se trouve à peu près raffiné au sortir de la mine.

En résumé, le prix de revient du soufre est de 18,50 fr., ainsi répartis : 12 p. 100 de fonçage; 58 de main d'œuvre; 22 de combustible; 6 de travaux préparatoires; 6 d'amortissement; 6 d'imprévu. Avec 15 fr. de fret, la Louisiane, si elle n'avait pas un débouché suffisant aux États-Unis mêmes, pourrait donc à la rigueur envoyer du soufre à 36 fr. dans nos ports d'Europe : le prix même auquel se vend le soufre contenu par nos pyrites.

e) GISEMENTS DE SOLFARES DIVERS : ESPAGNE, GRÈCE, FRANCE, ASIE

Espagne¹. — L'Espagne a produit 24.000 t. de minerai de soufre en 1908. Les exploitations de *Lorca* (Murcie), à la partie supérieure du miocène, portent sur des marnes gypseuses, parfois sableuses, avec strates ou géodes de soufre et toujours un peu d'hydrocarbures. Ces couches sont redressées contre un piton trachytique. Le gisement est à 35 km. du port d'Aguilas. Il y a trois bancs de soufre à 30 p. 100, épais de 0,2 m. à 0,40 m. et suivis sur près de 8 km.

A *Las Balsas de Gador* (Almeria), le soufre forme des amas dans un calcaire tertiaire, au contact de schistes triasiques.

A 20 km. Sud de *Teruel* en Aragon, le soufre est intercalé dans des calcaires jurassiques.

Grèce². — En Grèce, on trouve de petits gisements de soufre à 4 km. à l'Est de l'isthme de Corinthe au milieu des marnes gypseuses surmontées par du calcaire miocène, c'est-à-dire à peu près au même niveau qu'en Sicile.

Le calcaire s'élève à 700 m. sur le rivage Nord du golfe d'Egine et est assez fortement disloqué. C'est à environ 80 m. d'altitude qu'on rencontre le soufre. Il existe là des dégagements actuels de vapeurs sulfureuses et des excavations tapissées de cristaux de soufre, où la température atteint 100 degrés. Le soufre se trouve, en outre, en rognons dans les marnes gypseuses. Ces exploitations sont insignifiantes.

¹ 1860. DE BOTELLA. *Descr. geol. minera de las prov. de Murcia y Albacete*. — 1863. SEWELL. *Über die Schwefel Werke der Sp. Pr. Aragon und Murcia* (B. u. H. Z. t. 22, p. 334). — 1897-99. *Soufre de la S. de Gador* (Z. f. pr. G., 1897, p. 28, 1899, p. 268).

² 1876. TH. FUCHS. *Die Solfatara und das Schwefel Vorkommen von Kalamaki* (Grèce). (Verh. der KK. geol. R., p. 54; cf. N. J. Min., 1879, p. 837. Stuttgart). — 1877. ПЕТТВОН. *Note sur la formation du soufre à Calamaki* (Grèce) (Liège).

France¹. — En France, à *Biabaux*, près de Marseille, des couches lacustres et saumâtres miocènes renferment des bancs de lignite et de schistes bitumineux en même temps que des gypses. Une réaction secondaire a donné des imprégnations de soufre dans les lignites. D'autres petites mines du même genre sont exploitées en Vaucluse et le tout fournit (1909) 2.900 t. de marnes solfifères, employées au traitement des vignes en France et en Algérie.

Asie. — En *Perse*, outre le soufre volcanique cité plus haut, il y a, dans la chaîne de l'Elbourz, du soufre associé à des marnes gypseuses.

Au Sud-Est de la *Mer Morte*, il existe², dans le Lisan, des marnes sulfureuses associées à du gypse récent, mais qui, d'après Blanckenhorn, tiraient leur soufre d'autres gypses bitumineux primaires (dévonien?), cachés en profondeur. Il a expliqué la formation de ce soufre, suivant une hypothèse autrefois proposée pour la Sicile, par un échauffement de ces gypses bitumineux profonds, donnant des eaux chargées d'hydrogène sulfuré, qui montent au jour et s'y brûlent comme les fumerolles sulfurées des volcans. Une réaction inverse reproduit un peu de gypse secondaire. Mais la présence du soufre n'est pas en proportion de celle du gypse superficiel.

B. — PYRITE DE FER

Généralités métallogéniques³. — La pyrite de fer est une substance fréquente en inclusions dans les roches cristallines. C'est, d'autre part, un des plus abondants parmi les produits filoniens hydrothermaux et il n'est guère de filon qui n'en renferme. Entre ces deux types extrêmes de gisements viennent se placer, comme nous avons essayé de le montrer dans le chapitre v des généralités, toute une série nombreuse de gites, qui nous ont semblé alors participer à la fois des caractères ignés prédominants et des caractères hydrothermaux accessoires : gites que nous avons expliqués par une pénétration diffuse effectuée en profondeur et qui comportent des zones imprégnées, fahlbandes, veines, filets, noyaux ou lentilles de pyrites souvent très volumineuses. Enfin, l'on doit ajouter que la pyrite est un corps facile à remettre en mouvement par réaction chimique ; car son oxyda-

¹ *Soufre des Tapels*, près Apt (Vaucluse) (Revue de géol., Ann. des M., 7^e, t. 17, p. 289). — Cf. 1850. ZEUSCHNER. *Dépôt de soufre à Szwozowice* près Cracovie (B. G. S., 2^e, t. 7, p. 715). — 1852. DELAPORTE. *Sur les mines de soufre de la haute Egypte* (Ann. des M., 3^e, t. 1, p. 199).

² 1895. BLANCKENHORN. *Entstehung und Geschichte des Todten Meeres*.

³ 1855. *Sur l'exploitation des pyrites sulfureuses et de l'ocre du district de Borovitsch* (gouv. de Novgorod et du gouv. de Simbirsk). (Ann. des M., 5^e, t. 10, p. 613). — 1868. KNOCKE. *Sur la préparation de l'acide sulfurique au moyen des pyrites de fer et de cuivre* (Cuyper, t. 7, p. 165). — 1884. JULLIEN. *Structure microscopique des pyrites de fer*. — 1894. VOGT. *Ueber die Kieslagerstätten von Typus Rösos, Vigsnaes, Sulitelma, Rammelsberg* (Z. f. pr. G., p. 41, 117, 173). — 1895. BROWN. *Pyrite et marcassite* (C. R. Z. f. pr. G., p. 180). — 1895. HUNDT. *Das Schwefelkies und Schwerspath Vorkommen bei Meggen a. d. Lenne* (Z. f. pr. G., p. 156). — 1904. STOKES. *On pyrite and marcassite* (Bul. Un. St. geol. Surv., n° 186, 50 p.). — 1907. TRUCHOT. *Les pyrites* (1 vol. Dunod, avec bibl.).

tion donne un sulfate soluble, que les matières organiques réduisent ensuite aisément. Aussi la retrouve-t-on dans un grand nombre de terrains sédimentaires, concentrée : soit sur les matières végétales, comme la houille, qui en contient fréquemment ; soit sur les fossiles de toute nature, presque tous pyritisés dans certaines couches.

La métallogénie de la pyrite apparaît ainsi très complexe. Son intérêt pratique est d'ailleurs considérablement accru par la présence très fréquente de métaux associés à elle, qui viennent lui communiquer une valeur individuelle toute spéciale. Dans la majeure partie des cas, ce n'est pas comme minerais de soufre, mais surtout comme minerais de cuivre, ailleurs comme minerais de nickel, d'or, etc., que l'on exploite les pyrites. Cette association de métaux divers à la pyrite nous conduira nécessairement à diviser, entre plusieurs chapitres de cet ouvrage, la description de gîtes qui, en réalité, ne font qu'un, mais dont quelques-uns tiennent une telle place pour l'exploitation du cuivre, de l'or, etc., qu'il aurait été irrationnel de les étudier ici.

C'est un des inconvénients inévitables de l'ordre que nous avons adopté. Pour restreindre ce défaut le plus possible, nous nous bornerons, après de brèves indications théoriques, à décrire ici quelques rares types de gisements exclusivement exploités comme minerais de soufre, tels que les filons du Gard et de Toscane, ou les amas de Sain-Bel et nous renverrons, pour les autres, au chapitre du cuivre, qui est le métal donnant lieu à la majeure partie des travaux où l'on exploite les pyrites.

Les gisements pyriteux utilisés pour soufre appartiennent, en effet, à deux types de valeur très inégale. Quelquefois il paraît y avoir filons proprement dit, quoiqu'avec des conditions d'élargissement particulières, comme dans la région d'Alais, en France, en Algérie, à Boccheggiano et Gavorrano, en Toscane, etc. La faible valeur de la substance exploitée rend ce cas d'une importance pratique très secondaire quand le filon n'a pas pris une largeur exceptionnelle. Le plus souvent, les exploitations portent sur des amas lenticulaires, dont on connaît des types colossaux : soit que la pyrite y existe seule ; soit que l'on exploite à la fois, pour soufre et pour cuivre, des pyrites tenant une proportion suffisante de ce dernier corps. Ces amas se différencient totalement des filons par leur minéralisation compacte et nullement géodique. A peu près toujours intercalés dans les schistes, ils présentent souvent une allure zonée, due à leur mode de pénétration dans ceux-ci, qui a pu donner parfois l'idée inexacte d'une origine sédimentaire. Nous en avons déjà parlé¹ au chapitre v, et nous avons résumé à ce moment leur théorie générale. Quand nous en donnerons les descriptions de détail au chapitre du cuivre, nous reviendrons sur quelques études particulières de gisements simplement pyriteux, mais situés dans un groupe homogène comme ceux de la Scandinavie et de la province d'Huelva², où le but essentiel de l'exploitation est le cuivre.

Conditions nécessaires pour l'exploitation des pyrites. — Les points, où l'on exploite de la pyrite de fer uniquement comme minéral de soufre et

¹ Pages 89 et 164.

² La C^o d'Aguas Tenidas (Confesonarios), vend de la pyrite pure.

sans que la présence d'aucun autre métal justifie ce travail, sont assez peu nombreux. Il faut, en effet, pour que la pyrite de fer soit exploitable par elle-même, des conditions spéciales.

Avant tout, les gisements doivent être, ou situés dans un pays ayant par lui-même une industrie de l'acide sulfurique, ou facilement reliés à un tel pays par des transports maritimes à fret réduit. Etant donné l'avantage évident de transporter du soufre natif comme celui des mines de Sicile et de Louisiane qui sont exploitées au voisinage de la mer, plutôt que de la pyrite, dans laquelle la moitié du poids est perdue, les conditions de prix de revient se trouvent étroitement restreintes. C'est pourquoi les seuls pays où l'on exploite pratiquement la pyrite avec quelque intensité sont : d'abord les Etats-Unis, la France et l'Allemagne, dont l'industrie propre justifie amplement cette exploitation ; puis l'Italie et l'Autriche où elle se développe ; la Scandinavie, qui est bien située pour l'exportation et qui, en outre, cherche à utiliser maintenant le soufre des pyrites pour son importante industrie de papier au bois, par le procédé au sulfate de soude ; enfin le Sud de l'Espagne et du Portugal, où l'exportation est facile en dehors de la consommation locale. Nous renvoyons, à cet égard, au tableau 12, page 324. On y remarquera le développement considérable de la production aux Etats-Unis, en Italie et en Espagne dans ces dernières années : pour les deux premiers pays, en raison de leur propre essor industriel ; pour le dernier, par le développement des exportations. On peut noter également la place importante tenue par la France dans ce groupe de l'industrie minérale, grâce à son grand gisement de Sain-Bel, alimentant la puissante industrie de produits chimiques de Saint-Gobain.

En dehors de ces considérations générales, il y a encore lieu, dans l'appréciation d'un gisement pyriteux, de faire intervenir diverses observations plus particulières. D'abord, les conditions du marché de la pyrite, qui mettent cette substance à un prix généralement bas (15,50 fr. la tonne sur la mine de Sain-Bel, soit 35 fr. la tonne de soufre contenu rendue à Marseille), font qu'une exploitation n'est pas possible quand la masse pyriteuse ne représente pas un cube important : ce qui exclut aussitôt la plupart des filons pyriteux proprement dits.

Il faut, en outre, des conditions de pureté qui, dans ces gites filoniens, sont rarement réalisées. Un certain nombre de corps étrangers, que l'on trouve fréquemment associés à la pyrite, en diminuent notablement la valeur, parfois jusqu'à la rendre invendable.

L'arsenic, en trop grande quantité, est nuisible. Brûlé avec le soufre, il se volatilise en acide arsénieux et se dissout dans l'acide sulfurique produit pour se disséminer dans tous les produits fabriqués avec cet acide.

Si les gangues des pyrites sont calcaires, le carbonate de chaux se décompose sous l'influence des acides produits et se transforme en sulfate de chaux : ce qui entraîne une perte en soufre et rend la pyrite impropre aux usages métallurgiques ; en outre, l'acide carbonique produit occupe inutilement une partie de la capacité des chambres de plomb.

S'il existe de la fluorine, elle donne, sous l'action de l'acide sulfurique, de l'acide fluorhydrique, qui altère considérablement la valeur de l'acide obtenu par son action trop violente sur certains corps.

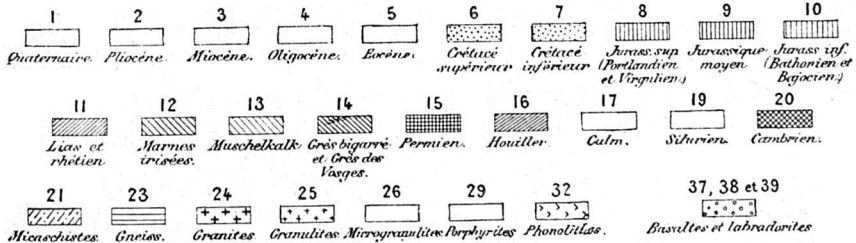
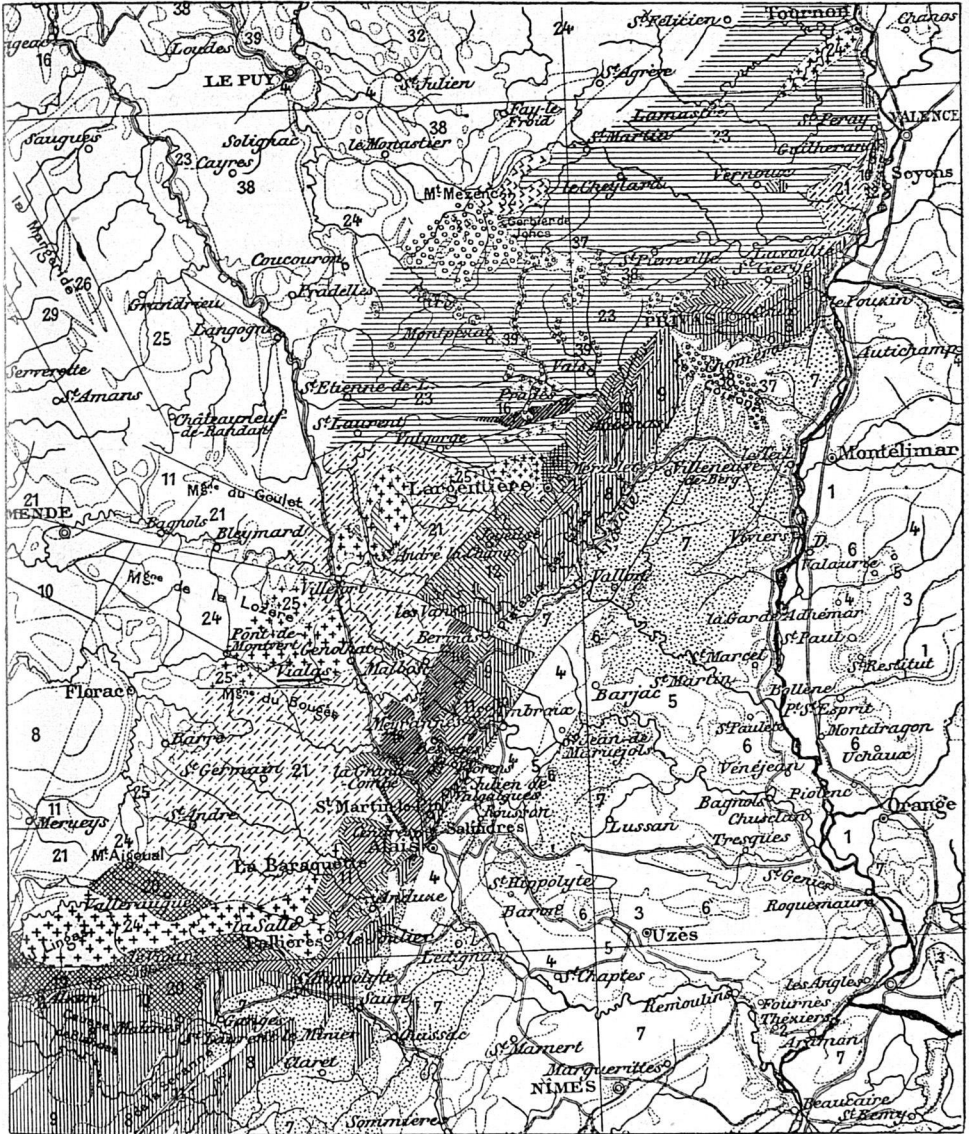


Fig. 24. — Carte géologique au 1/1 000 000^e de la zone pyrénéenne du Gard et de l'Ardèche.

La constitution physique (dureté, friabilité, etc.), est également un facteur important.

Si l'on ajoute les conditions ordinaires de la concurrence commerciale entre les gros producteurs et les petits, on s'explique comment, en France, la presque totalité de la production vient de Sain-Bel (281.000 t. sur 283.000 en 1907), quoiqu'il y ait divers autres petits gisements concédés et même exploités.

Nous allons commencer par décrire quelques gisements, dont le caractère filonien ne paraît guère douteux. Nous passerons ensuite au cas de Sain-Bel, qui nous servira de type comme gisement en amas.

1° TYPE FILONS PYRITEUX

a) **Filons pyriteux de France (Gard, Ardèche, Morvan) et de l'Algérie.** — Les filons pyriteux, envisagés dans leur ensemble, se présentent exactement dans les mêmes conditions que les filons renfermant des sulfures de plomb, zinc, etc. Des trois métaux constamment associés, B. G. P., tantôt l'un, tantôt l'autre peut prédominer, et souvent avec des changements de composition qui se produisent sur la longueur d'un même filon.

En pratique, la presque totalité des filons exploités pour pyrite sont des filons tertiaires remplissant des failles échelonnées au milieu de terrains secondaires, où les calcaires abondent et pénètrent latéralement, sous forme de filons-couches, dans les contacts de ces terrains. Les filons d'incrustation nette dans des fentes ouvertes en roche solide n'interviennent guère. Assez fréquemment on croit voir une relation de ces pyrites avec des roches cristallines, qui tendrait alors à en faire des gisements de contact ou de départ immédiat, préparant le type en amas que nous étudierons ultérieurement.

Par exemple, en France, une zone métallisée fort intéressante suit les fractures Nord-Est, par lesquelles se termine, de Valence à Privas et Alais, le Plateau Central (fig. 24)¹.

En suivant les collines jurassiques qui séparent, dans le Gard, le terrain houiller du valanginien, on rencontre la pyrite à chaque pas sur une longueur de 30 à 40 km. Sa présence est, en général, accusée par des affleurements de fer hydroxydé, provenant de la décomposition de la pyrite elle-même sous l'influence de l'air et parfois assez purifiés en soufre par l'oxydation pour être utilisables. A une certaine profondeur, le minerai de fer se trouve mélangé de parties pyriteuses abondantes. Enfin, ce fer hydroxydé disparaissant complètement, on arrive à la masse même de pyrites.

Nous reviendrons plus tard sur quelques minerais de plomb et de zinc importants dans cette zone ; bornons-nous pour le moment à décrire, du Nord au Sud, les gisements de pyrite qui, sans jamais prendre de réelle

¹ On a concédé pour pyrite : dans l'Ardèche, Charmes et Soyons ; dans le Gard, les Adams, Cendras, Pallières, St-Félix, St-Jean de Valeriscle, St-Jean de Valgalgues, le Soulier, Valleraube ; en Saône-et-Loire, Chizeuil. — Soyons se trouve sur la feuille au : 80 000^e de Valence ; Saint-Julien-de-Valgalgues sur celle d'Alais ; le Soulier sur celle du Vigan. — Voir : 1876. P. ΜΑΝΤHÈS. *Gisements de pyrite des environs d'Alais*.

importance industrielle, ont été à diverses reprises exploités. Beaucoup de ces gisements présentent (sans doute en raison de leur origine filonienne) ce caractère fâcheux de renfermer de la fluorine. Ils sont souvent venus s'intercaler entre des sédiments d'inégale compacité, calcaire d'une part, argiles et marnes de l'autre, avec des allures de filons-couches réduits à des poches, que l'on a quelquefois pu croire réellement interstratifiés.

Soyons est situé à 4 km. Sud de Valence. La pyrite y forme, sur 270 m. de long et 160 m. suivant la pente, avec une épaisseur qui ne dépasse pas 1 à 2 m., une poche interstratifiée dans le trias, au toit d'un banc de dolomie dont elle est séparée par un lit marneux de 0,25 m. à 0,50 m.

La pyrite est de coloration grise ou noire et cristallisée en rognons

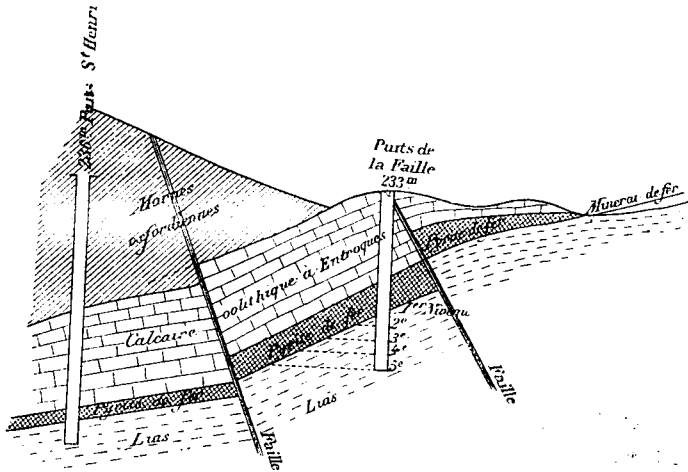


Fig. 25. — Coupe transversale du gîte de Saint-Julien-de-Valgalgues.

mamelonnés de structure rayonnée. Elle est très dure, fait feu au briquet et ne donne que peu de menu. Elle contient de l'arsenic, de l'antimoine et du fluorure de calcium.

Saint-Julien-de-Valgalgues (fig. 25) est à 7 km. d'Alais. Surmontée d'un chapeau de fer hydroxydé, la pyrite y a incrusté, par un phénomène que nous retrouverons bien souvent pour les minerais de plomb et de zinc, le plan de joint entre deux strates d'inégale compacité physique, qui sont ici : au toit, le calcaire à entroques; au mur, le lias plus argileux.

La masse pyriteuse a la forme d'un fuseau dirigé vers le N. 15° E. ; deux failles presque verticales la recourent. Sa puissance varie de 1 à 12 m. La présence de fossiles pyritisés nombreux dans la pyrite montre bien l'introduction postérieure et hydrothermale de la pyrite.

On a, comme gangues, la calcite, une certaine quantité de fluorine et un mélange de grès blanc et d'argile.

Le Soulier a été exploité à diverses reprises depuis 1858. Ce gisement

se compose de deux parties. L'une, située dans la dolomie infraliasique, comporte plusieurs failles parallèles de direction moyenne N.-E. S.-W. incrustées par la pyrite. L'autre, située dans le trias supérieur, est très irrégulière et se compose de petits éléments de filons et d'amas lenticulaires de forme et de teneur très variables. La pyrite du Soulier est peu arsenicale, mais très altérable et à gangue de dolomie.

Dans le *Morvan*, on a fait, sur des filons pyriteux semblables, quelques tentatives d'exploitation, notamment à Champrobert.

En *Algérie*, nous avons décrit autrefois avec détails le groupe des filons sulfurés ferro-plombo-zincifères, en insistant sur son unité métallogénique¹. Il existe des zones métallisées, le long desquelles des imprégnations latérales portent sur des calcaires secondaires de divers âges, rappelant tout à fait ce que nous venons d'observer dans le Gard. Dans la plupart de ces gisements, la pyrite de fer a été transformée par oxydation en hématite, ou parfois d'abord en sidérose, et c'est cette forme oxydée qui y a généralement seule attiré l'attention. Mais, en profondeur, ces gisements passent à de la pyrite, souvent avec chalcopyrite.

Nous nous contenterons de signaler le gisement d'*El Auzouar* (30 km. S.-E. de Bougie), concédé pour pyrite de fer et qui présente ce cas intéressant d'une lentille pyriteuse en plein calcaire sous un chapeau de fer oxydé, arrêté à 4 m. de profondeur. Ce gisement filonien, dont le cube reconnu peut être de 30 à 40 000 t., se trouve dans des terrains friables du trias et nous avons expliqué, dans ce cas, la persistance de la pyrite par l'affouillement rapide des terrains, qui a dû creuser le ravin en mettant à découvert des parties nouvelles de la pyrite avant que celle-ci n'ait eu le temps d'être oxydée. C'est l'exemple le plus important d'un système d'amas pyriteux filoniens, assez nombreux autour de Bougie et souvent situés au contact des roches éruptives tertiaires avec divers terrains, notamment avec les schistes de l'éocène supérieur.

On pourrait également rapprocher de ce groupe le grand gisement de *Kef-Oum-Theboul*, situé plus à l'Est, où l'on a exploité une association complexe de pyrites cuivreuses, galènes et blends.

b) Filons pyriteux de Gavorrano, etc., en Toscane. — L'Italie a beaucoup développé, dans ces dernières années, sa production de pyrite. En dehors de la région alpine où se trouve l'ancien gisement d'Agordo (Vénétie), qui sera décrit plus loin comme type d'amas cuivreux, ces pyrites proviennent de toute une longue zone métallisée filonienne à sulfures complexes située en Toscane².

La plupart des filons pyriteux exploités dans cette région, à Bocchegiano, la Fenice, etc., étant surtout travaillés en raison de leur teneur en cuivre, nous en remettons la description, comme pour tous les cas semblables, au chapitre où il sera question de ce métal. Nous verrons dans

¹ 1903. L. DE LAUNAY. *Richesses minérales de l'Afrique*, p. 310 à 330. Voir notamment *El Auzouar*, p. 174 et 326; *Kef-oum-Theboul*, p. 329.

² En 1908, la production des pyrites italiennes est montée à 131.700 t., dont 48.240 pour le district de Turin (mine Chialamberti-Cantone), 28.000 pour le Vicentin (Vallimperina), 35.000 pour le district de Grosseto et 19.000 pour la région de Gènes. La Toscane a produit, en outre, 92.500 t. de pyrite cuivreuse à 2,40 p. 100 de cuivre.

l'ensemble que les incrustations pyriteuses ont rempli, avec substitution latérale, un certain nombre de failles le long de horsts anciens émergeant au milieu de terrains tertiaires. Ce sont des conditions analogues à celles étudiées plus haut dans le Gard.

De ces gisements toscans nous en décrivons un seulement ici, celui de Gavorrano, qui est exploité uniquement comme pyrite, et dont le type est, nous allons le voir, très spécial.

Ce gisement de *Gavorrano*⁴ (voir fig. 26 à 29) est formé d'une masse pyriteuse exceptionnellement cristalline, au contact du granite tertiaire et d'un calcaire rhétien, sur lequel le granite a exercé son métamorphisme. B. Lotti a admis, entre le granite et la pyrite, une relation directe de cause à effet par départ immédiat, qui ne nous paraît pas absolument prouvée, mais qui concorde pourtant avec l'idée générale à laquelle on arrive, dans tout ce pays, sur l'influence minéralisatrice exercée par la mise en place des granites tertiaires.

Comme le montre la carte fig. 26, il apparaît, à Gavorrano, au milieu de l'éocène (e), sur le prolongement direct des massifs anciens de la région de Boccheggiano et avec la même direction Nord-Sud, un petit îlot ou horst composé d'un noyau de granite (g) avec deux flancs de micaschistes permien (pm) et de calcaires rhétiens (r) surmontés par du lias (l').

Des deux côtés du granite (fig. 27), il existe, au contact, des indices métallifères, qui ont paru une preuve en faveur de l'émanation directe, mais qu'un contact mécanique pourrait également expliquer. A l'Est, on a seulement un filon quartzeux inexploré, avec traces de zinc et de cuivre sans pyrite. A l'Ouest, on a, au contraire, un filon de pyrite, très remarquable par sa pureté presque absolue et également par sa cristallinité, qui la rend plus facile à brûler; cette cristallisation en beaux cubes souvent très volumineux donne aux chantiers d'abatage un éclat exceptionnel et un miroitement remarquable sous la lumière des lampes. L'exploitation,

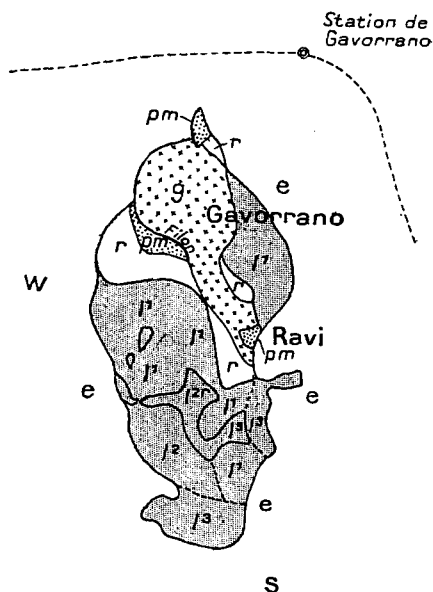


Fig. 26. — Carte géologique au 1/100 000° du massif de Gavorrano, d'après B. Lotti.

⁴ Gisement visité en 1906. — *Métallogénie de l'Italie*, p. 87 à 92. — Voir : Feuille au 1 : 100 000° de Piombino. — Lotti. *Sul giacimento di pyrite di Gavorrano* (Rass. min., t. 15, 1901 et t. 16, 1902. Riv. del Serv. Min. nel 1908, p. 196). D'après B. Lotti, le granite passe, comme celui de l'île d'Elbe, à un microgranite tourmalinifère. A son contact, il s'est développé, dans les schistes probablement permien, de la chistolite et de l'andalousite; dans les calcaires recristallisés, du spinelle. Le granite lui-même, au bord des terrains sédimentaires, change de grain et se charge de tourmaline et de pyrite.

commencée en 1904, a produit dès 1905, environ 20.000 t. de pyrite à 48 p. 100 de soufre, expédiée en grande partie aux fabricants d'acide sulfurique lombards¹.

En plan (fig. 29), l'on a reconnu, d'abord, trois lentilles en chapelet,

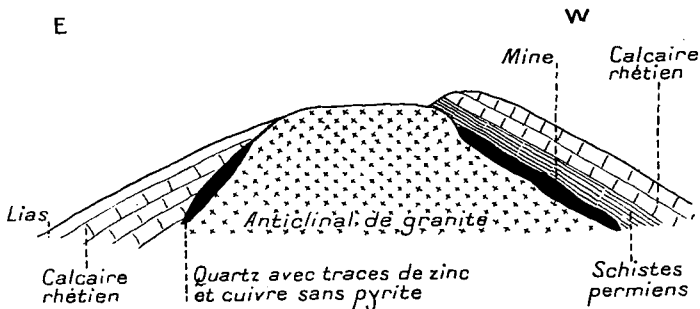


Fig. 27. — Coupe transversale Est-Ouest du massif de Gavorrano.

bien séparées l'une de l'autre, probablement suivies au Nord par une quatrième, qui n'a été encore recoupée qu'au niveau d'exploitation supérieur. La lentille du milieu, la plus importante, a 150 m. de long sur 12 m

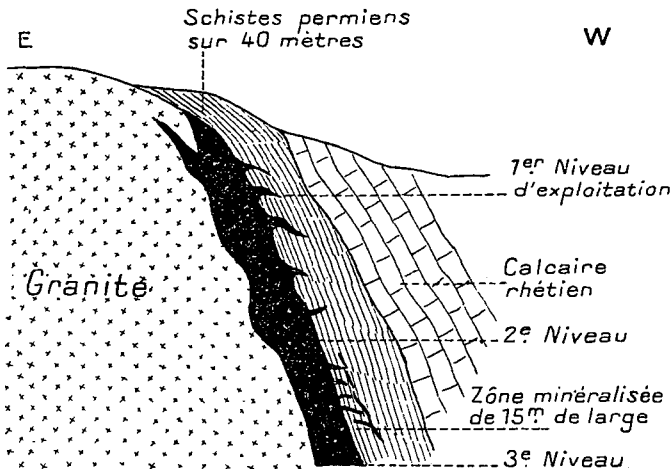


Fig. 28. — Coupe transversale E.-W. théorique du gîte de Gavorrano.

de largeur maxima. A la fin de 1908, une galcrie de recherche a rencontré en pleins schistes une autre belle lentille de pyrite friable et pure.

En coupe transversale (fig. 27 et 28), le minerai vient buter contre le granite par une paroi très nette disposée en gradins, parfois avec surplombement, qui paraît l'effet d'un système d'accidents mécaniques. Dans la

¹ Cette mine contribue, pour une forte part, aux 35.000 t. de pyrite de fer extraites en 1908, dans le district de Florence.

partie haute, on avait trouvé un branchement latéral de 3 à 4 m. de large, que l'on avait pu interpréter comme une sorte de ségrégation magmatique, mais qui ne s'est pas renouvelé en profondeur. Puis vient, dans l'Est du gisement, une première zone contenant des parties de granite à veinules pyriteuses et parfois même des enclaves de granite non pyriteux¹. Il existe, à ce mur, une zone plus impure, plus chargée de quartz, qu'on laisse de côté dans l'exploitation.

Après quoi se développe une masse très remarquable de pyrite absolument compacte et pure avec fort peu de quartz. Cette pyrite, comme je viens de le dire, se distingue aussitôt de celle qui forme les autres grands amas pyriteux, tels que ceux de Sain-Bel, de Rûros ou du Sud de l'Espagne, par son mode de cristallisation, beaucoup plus assimilable à celui d'un filon d'incrustation que dans les amas en question: Au lieu de masses formées uniquement de pyrite fine, on a des zones de grands cristaux alternant d'une façon confuse avec des zones de pyrite grenue. Dans les premiè-

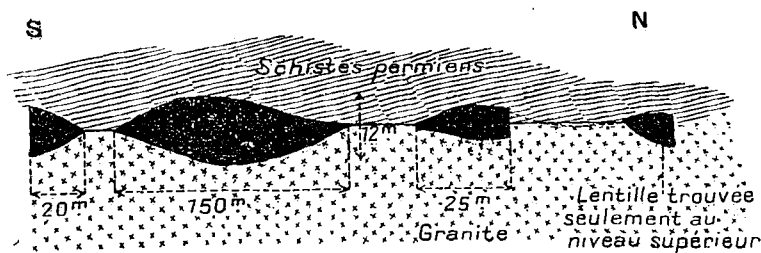


Fig. 29. — Plan théorique des gisements de Gavorrano.

res, les cubes de pyrite ont fréquemment plusieurs centimètres de côté et sont enchevêtrés par macles multiples les uns dans les autres. Il existe ainsi des veines ou des noyaux comparables à des remplissages de géodes et pouvant s'étendre sur 0,10 à 0,20 m. de large, qui alternent avec des pyrites très fines où l'on ne voit pas le quartz.

Enfin, le toit est formé de schistes micacés permieniens, où les veines pyriteuses s'étalent encore parfois sur 15 m. de large, et, par-dessus, vient le calcaire rhétien, recouvert à son tour par du lias.

En moyenne, la pyrite est tout à fait pure et ne contient pas du tout de cuivre; on a cependant rencontré, au Sud du niveau supérieur, des traces de galène et de blende.

2° TYPE AMAS PYRITEUX

Principaux amas pyriteux. — La place que tiennent dans l'industrie mondiale quelques très grands amas pyriteux pourrait faire illusion sur

¹ La disposition est analogue à celle du stockwerk manganésifère qui pénètre le granite dans une partie du gisement de Romanèche en Saône-et-Loire, également situé, comme nous le verrons, au contact du granite et de calcaires sédimentaires (liasiques), avec pénétration dans les calcaires du toit. Le rapprochement serait encore plus net, si, comme je le crois, il fallait voir, dans ce gîte de Romanèche, l'altération d'un gîte pyriteux profond.

leur nombre réel. Il faut donc remarquer d'abord combien, en réalité, ont été rarement réalisées ces concentrations de plusieurs millions de tonnes, dont ressortira mieux ainsi le caractère exceptionnel. C'est ce que montre le tableau 6 inséré précédemment¹, où nous avons essayé de grouper les données les plus caractéristiques relatives aux principaux gisements européens, sans séparer ceux pour lesquels l'exploitation a été motivée par la présence du cuivre, comme Rio Tinto, Tharsis, etc., de ceux où la pyrite n'est pas cuprifère.

En Europe, on doit signaler, avant tout, le Sud de l'Espagne et la zone contiguë du Portugal avec les gites de Rio Tinto, Tharsis, la Zarza, Aguas Tenidas, San Domingos; puis la Scandinavie avec Sulitjelma, Bosmo, Falun, Röros, Vigsnæs, etc.; dans le Harz, le Rammelsberg; en Hongrie, Schmollnitz; en Vénétie, Agordo.

Dans les autres continents, il existe assurément des amas de pyrite comparables; mais, sauf aux Etats-Unis, les considérations industrielles, dont nous avons dit un mot, ne permettent de les exploiter que lorsqu'ils contiennent assez d'or, de cuivre, de nickel, etc. Nos renseignements sur la plupart de ces gisements étant trop incomplets pour nous permettre de leur donner place dans notre tableau, nous nous contenterons d'en signaler un, auquel il pourra sembler singulier de faire une place ici (l'objet de son exploitation étant tout autre), mais dont précisément, à cause de cela, il nous paraît intéressant de comparer le cube de pyrite à celui des gisements précédents: ce sont les conglomerats aurifères du Witwatersrand au Transvaal.

Un calcul approximatif montre qu'il y a là, sur 45 km. de long et 2 de large, environ 400 MT de conglomerats pouvant contenir 3 à 4 MT de pyrite, qui, concentrés en un seul amas, formeraient donc au minimum une lentille comparable à celles d'Aguas Tenidas ou de Schmollnitz. Les pyrites (supposées isolées de leur gangue) renfermeraient environ 1 500 gr. d'or et 150 gr. d'argent à la tonne, avec des traces de nickel, rarement de cuivre, jamais de plomb ou de zinc.

Nous décrirons seulement, dans ce paragraphe, le gisement typique de Sain Bel, renvoyant, comme nous l'avons déjà dit, pour les autres, au chapitre du cuivre.

SAIN-BEL (RHONE)²

La presque totalité de la pyrite consommée en France est fournie par l'amas principal de Sain-Bel, dont les dimensions ne sont surpassées que

¹ Tableau 6, page 98. Voir également, page 324, la répartition de la production.

² Gisement visité en 1900. — Coll. Ecole des Mines, 1324 et 1786. — Voir les feuilles de Lyon et de Bourg.

1819. CORDIER. *Sur les cristaux de cuivre carbonaté* (Ann. d. M., 1^{re} série, t. 4, p. 1). — 1820. THIBAUD et BERTHIER. *Analyse de quelques minéraux et produits de la fonderie de Chessy* (Ann. d. M., 1^{re} série, t. 5, p. 520). — 1833. RAVY. *Sur le gisement des divers minerais de cuivre de Sain-Bel et de Chessy* (Ann. d. M., 3^e série, t. 4, p. 393) — 1876. AIMÉ GIRARD et MORIN. *Etude des pyrites employées en France* (Ann. de chimie et phys., 5^e série, t. 7). — 1900. *Notice de la C^{ie} de Saint-Gobain pour l'Exposition universelle*. — 1901. L. DE LAUNAY. *Die Schwefelkies Lagerstätte von Sain-Bel (Rhône)* (Z. f. pr. G., p. 161 à 170) et *Les pyrites de Sain-Bel* (La Nature, 3 juin 1911).

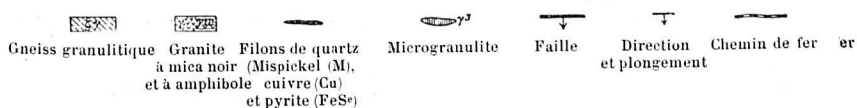
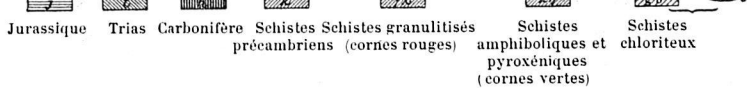
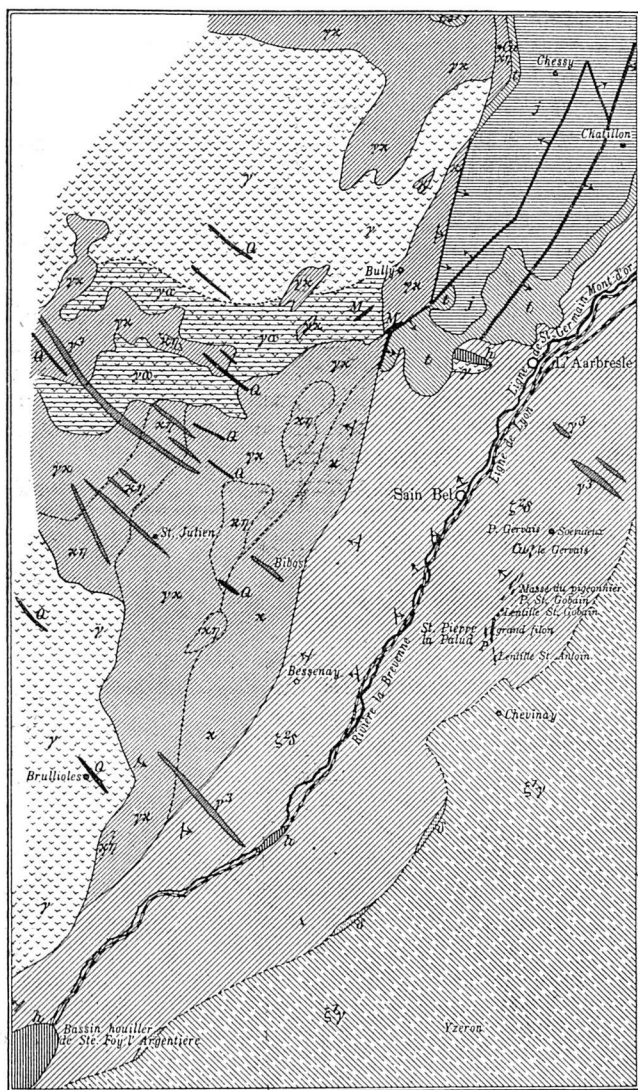


Fig. 30. — Carte géologique de la région de Sain-Bel et Chassy.

par les grands amas du Sud de l'Espagne et par celui de Falun en Suède. Aussi décrivons-nous ce gisement en détail comme type bien connu d'un phénomène qui présente ailleurs d'autres cas comparables. Nous lui rattacherons, bien qu'il ait été exploité autrefois uniquement pour cuivre, le gisement de Chessy, qui paraît appartenir à la même formation métallifère, modifiée dans ce cas-là par le contact de terrains calcaires et par des altérations superficielles.

Disposition générale des gisements.— Le gisement de Sain-Bel est situé à environ 20 km. Nord-Ouest de Lyon, un peu au Sud de la petite ville de l'Arbresle, à l'Est de la rivière la Brevenne (fig. 30).

Il constitue une zone pyriteuse Nord-Sud, presque continue, d'environ 2 km. de long, qui, par des affleurements disséminés et encore mal connus un peu plus à l'Ouest, sur la rive gauche de la Brevenne, notamment vers Bully (filons de mispickel), semble se rattacher, une dizaine de km. plus au Nord, au gisement cuivreux classique de Chessy (2 km. W du village de même nom), aujourd'hui abandonné. L'existence, dans l'intervalle, de terrains de recouvrement jurassiques postérieurs aux formations pyriteuses et, là même où ces terrains n'existent pas, la présence de riches vignobles et de terrains agricoles d'une grande valeur rendent les observations très difficiles.

Si l'on examine la carte géologique de cette région, dont la fig. 30 donne une esquisse simplifiée, on voit que les gisements de Chessy et ceux de Sain-Bel sont dans deux terrains qui présentent une structure minéralogique différente (peut-être par l'effet du métamorphisme): les premiers dans les schistes feldspathisés et schistes pyroxéniques ou amphiboliques précambriens (cornes vertes), marqués $\alpha\eta$; les seconds dans les chloritoschistes, avec schistes amphiboliques ($\zeta^2\delta$)².

Chessy³. — La mine de Chessy aurait pu être décrite ultérieurement comme ancienne exploitation de cuivre française. Il vaut mieux ici en montrer les rapports possibles avec les gisements de Sain-Bel, et mettre ainsi en évidence les facies très particuliers que peut provoquer l'altération superficielle d'un gisement pyriteux profond.

Il y a eu là, dans des schistes feldspathisés, des imprégnations de pyrite de fer, à teneur en cuivre souvent assez forte (6 à 12 p. 100 d'après les descriptions), avec un peu de quartz et de barytine, sur lesquelles ont porté, d'abord des exploitations romaines, puis, vers 1450, des travaux du fameux banquier de Charles VII, Jacques Cœur.

En 1809, on était à 215 m. de profondeur et la teneur en cuivre,

¹ A environ 70 km. Ouest de Sain-Bel, le seul gisement de cuivre qui ait eu, dans ces dernières années, quelque importance en France, celui de la Prugne (feuille de Roanne), se trouve en relation avec des schistes précambriens et dévoniens également accompagnés de schistes amphiboliques, le long de la grande faille du Forez (Voir les fig. 316 à 318).

² D'anciens observateurs, notamment Raby (Ann. des Mines, 1833, p. 397), considéraient les roches anciennes de Chessy et celles de Sain-Bel comme semblables.

³ Voir Annales des Mines (1^{re} série, 1819, 1820 et 1833), articles de Cordier, Thibaud et Raby (ce dernier ancien directeur des mines de Chessy).

probablement accrue dans les parties hautes par des réactions secondaires, diminuait notablement, quand, tout à fait par hasard et même, d'après Cordier, à la suite d'une erreur, on découvrit, un peu plus à l'Est, dans les grès et argiles du trias ou du rhétien, près de leur contact avec les schistes précambriens, des veines d'oxydure de cuivre et de carbonate de cuivre bleu, la chessylite, qui rendirent une prospérité momentanée à cette mine.

Nous reproduisons ci-joint (en donnant seulement aux terrains leurs noms modernes) les coupes très instructives de ce gisement publiées en 1833, par Raby (fig. 31 et 32).

Comme on le voit, les gisements de Chessy ont compris :

1° Un amas pyriteux AA (mine jaune), intercalé dans les schistes pyroxéniques et amphiboliques précambriens (cornes ou aphanites des anciens auteurs). Cet amas était formé d'un mélange de pyrite blanc jaunâtre à 6 p. 100 de cuivre et de chalcopyrite jaune

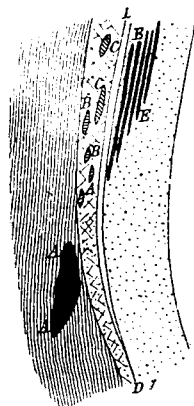
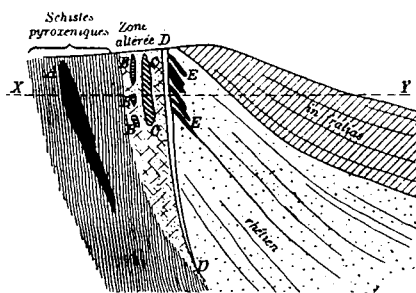


Fig. 31. — Coupe verticale du gîte de Chessy, d'après Raby.

Fig. 32. — Plan horizontal au niveau XY de la figure 31.

A, pyrite cuprifère (mine jaune dans les schistes pyroxéniques); B, mine noire; C, mine grise (minerais oxydés); D, veine verticale de mine rouge (argile rouge avec cuprite); E, mine bleue (filons de chessylite dans le grès).

foncé à 15 ou 20 p. 100, témoignant ainsi d'un remarquable enrichissement en cuivre par cémentation superficielle. Sa plus grande section horizontale, prise à 20 m. de profondeur, était de 15 m. sur 120 m.; sa profondeur d'un peu plus de 200 m. Il passait, dit-on, progressivement, par imprégnation latérale, à la roche encaissante sans en être séparé par de véritables épônes.

2° Dans une zone de décomposition séparant les cornes vertes précambriennes du rhétien, on a trouvé des rognons de « mine noire ou grise » BB, CC, dont le plus gros avait 3 m. sur 5 et 12 m. et qui semblaient dus à une altération sur place de la pyrite. Ces rognons étaient formés de bioxydes de cuivre, avec pyrites de cuivre et de fer et silice, à teneur variable entre 6 et 15 p. 100 de cuivre et parfois mélangés avec des schistes.

3° Suivant le contact même des deux terrains, qui semble marquer une faille, on a exploité, entre 1825 et 1833, une couche verticale d'argile rougeâtre DD avec cristaux et lamelles de cuprite disséminés, parfois aussi avec cuivre natif, dite « mine rouge ». Cette couche, assimilable à un

remplissage de faille, avait de 2 à 4 m. d'épaisseur et contenait des fragments anguleux de roche précambrienne empâtés dans l'argile.

4° Enfin, dans les grès et argiles triasiques, on a trouvé plusieurs veines EE, imprégnées de carbonate de cuivre bleu en veinules, en boules ou géodes. La plus considérable avait 150 m. de long suivant l'horizontale, 30 m. de large suivant l'inclinaison et 0,50 m d'épaisseur. L'ensemble constituait un amas de 400 m. de long, 40 m. de large et 20 m. d'épaisseur, en relation directe avec la veine de mine rouge. C'est de là que sont venus tous les cristaux de chessylite aujourd'hui répartis entre les grandes collections minéralogiques du monde. La formation de cet amas carbonaté (comparable par exemple à ceux qu'on a exploités à Mednoroudiansk dans l'Oural¹), avait été évidemment provoquée par la présence des calcaires infraliasiques au-dessus des grès rhétiens et triasiques. On y rencontrait, sous la forme oxydée, tous les éléments accessoires de la pyrite primitive (oxyde de fer, calamine, cérusite). Il devait résulter, par un phénomène essentiellement secondaire, de l'infiltration d'eaux superficielles ayant pénétré dans les grès (comme dans un filtre) par leur partie supérieure, après avoir emprunté du cuivre au voisinage.

Allure générale des gisements de Sain-Bel. — Plus au Sud, la zone pyriteuse de *Sain-Bel*, dont les figures 33 et 34 représentent le plan et la coupe, commence aux environs du village de Sourcieux, vers le puits Gervais, par quelques filons minces souvent cuprifères et parfois légèrement blendeux, qui ont donné lieu à d'anciennes exploitations. Puis viennent: au S.-W., le groupe des filons 1 et 2; à l'Est, les filons Francisco et Marcet et la masse du Pigeonnier: ensemble constituant la région Nord, qui est pour le moment tout à fait abandonnée en raison d'un plan méthodique d'exploitation adopté depuis 1872.

Le *filon 1* commence par avoir 2,50 m à 6 m. de large sur 360 m. de long; il est formé seulement de pyrite de fer. Le *filon 2*, qui en est séparé par 6 m. de roche stérile, a 1 m. à 1,50 m d'épaisseur, avec une teneur en cuivre qui atteint jusqu'à 7 p. 100. Après un rejet vers l'Ouest, le filon 1 reprend avec une épaisseur de 7 à 8 m., comportant à l'Ouest une bande cuivreuse de 1,50 m à 2 m.; le filon 2, au contraire, épais de 2 à 3 m. n'est plus cuivreux.

La *masse du Pigeonnier* a été autrefois, jusqu'en 1872, un élément important dans la production de Sain-Bel. Une coupe ci-jointe (tout à fait théorique, figure 35), en montre la disposition générale. Jusqu'à 70 m. de profondeur, on a eu une longue lentille mince ou plutôt un chapelet de trois lentilles discontinues ayant une longueur totale de 225 m. Vers 70 m., les trois lentilles se sont rejointes et, en même temps, brusquement renflées de manière à former une grande masse de 28 m. d'épaisseur en pyrite très pure qui, plus bas, vers 136 m., s'est divisée, dans son épaisseur, en 3 colonnes distinctes, en même temps que la pyrite se chargeait fortement de quartz et de cuivre et ne contenait plus que 43 p. 100 de soufre.

Au Sud du puits Saint-Gobain commence la région Sud, qui est aujourd'hui la région en exploitation et qui fournit par an environ 300 000 t.

¹ Voir plus loin, les figures 311 à 315.

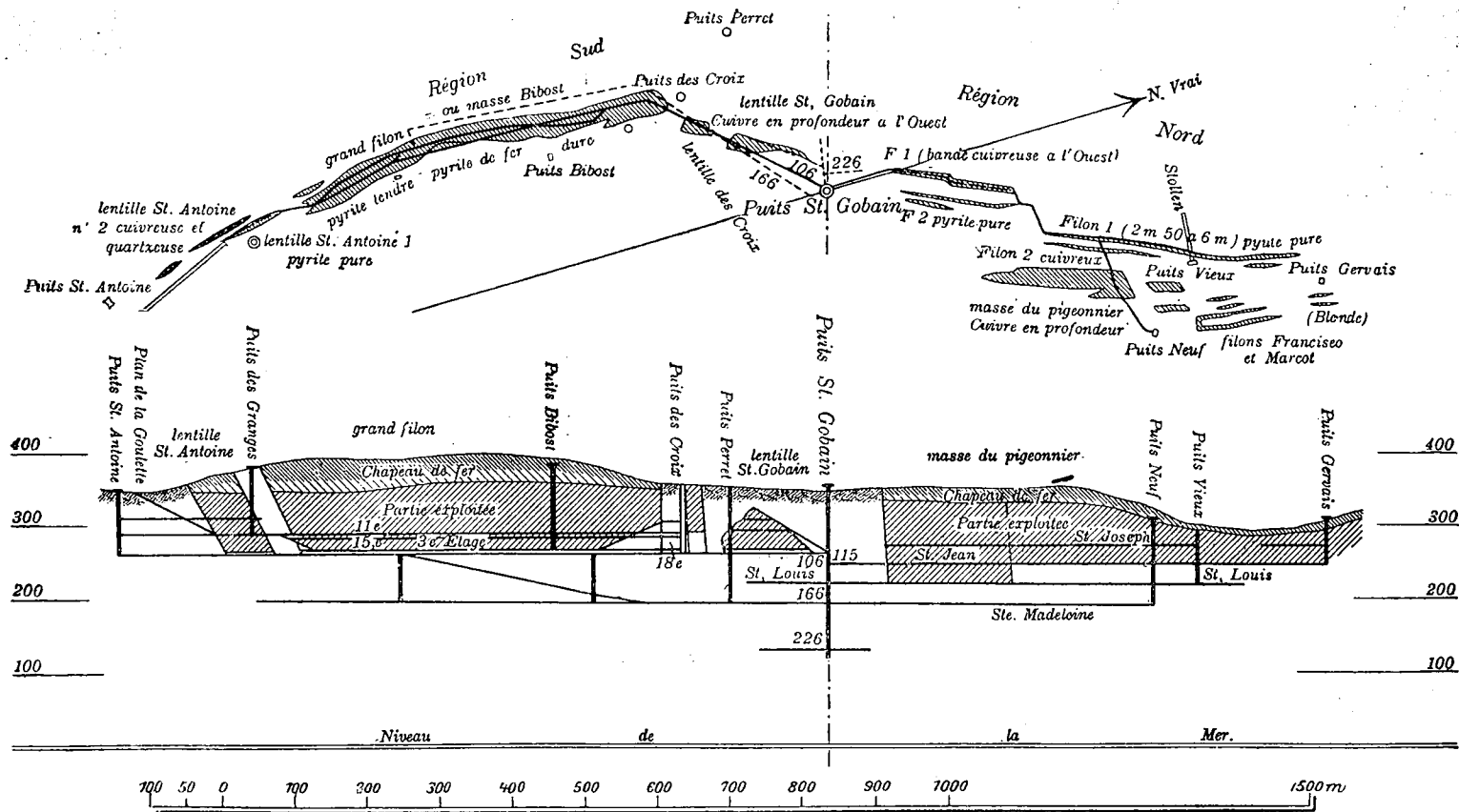


Fig. 33 et 34. — Plan horizontal et Coupe longitudinale des gisements de Sain-Bel.

de pyrite remarquablement pure. Cette zone est formée par la lentille Saint-Gobain, la lentille des Croix, le grand filon ou masse Bibost et enfin les lentilles Saint-Antoine. Tout cet ensemble offre ce caractère commun qu'il n'était représenté à la surface que par des affleurements insignifiants ou même nuls ; le grand filon n'a été découvert qu'en 1862, par hasard. Ce fait de lentilles de pyrite ne montant pas jusqu'au jour est loin d'être unique et l'on en a cité divers exemples, soit dans le Sud de l'Espagne, soit en Scandinavie ; il est néanmoins intéressant à mettre en lumière une fois de plus.

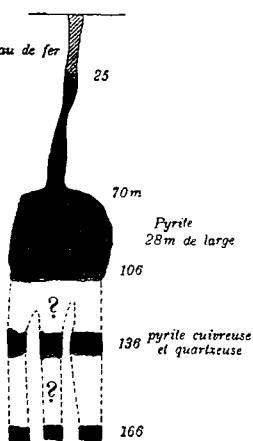


Fig. 35. — Coupe théorique de la masse du Pigeonnier.

La *lentille Saint-Gobain* a une forme assez compliquée que nous avons précédemment représentée par les figures 5 et 6¹. Formée dans sa masse de pyrite de fer très pure, elle devient seulement un peu cuivreuse et blendeuse du côté Ouest sur environ 3 m. de large quand on s'enfonce à 166 m.

Le *grand filon* (fig. 36), une des plus belles masses pyriteuses du monde, a une longueur totale de 600 m. avec une largeur qui, nulle à l'affleurement, est de 14 à 18 m. à 30 m. de profondeur, de 20 à 25 à 60 m., et de 18 à 44 depuis 106 m. jusqu'à 136 m., niveau actuel des travaux. Un approfondissement de 1 m. correspond à l'enlèvement de 80 000 t., ou 16 000 m³ de pyrite : c'est-à-dire que la section est de 16 500 m², le double de celle du Rammelsberg, transversalement à l'axe de ce gisement. Les travaux de recherche ont montré qu'après avoir atteint son maximum d'épaisseur au niveau 136, l'amas allait en diminuant pour disparaître presque complètement au-dessous de l'étage 226. Une grande faille, qui affleure au jour vers le puits Gervais, au Nord des gisements et qui a une faible pendage de 23° vers le Sud, paraît avoir amené la limitation générale du gîte en profondeur. Jusqu'ici, on a extrait de cette lentille environ 5 millions de tonnes. Le cube total a pu être de 9 à 11.

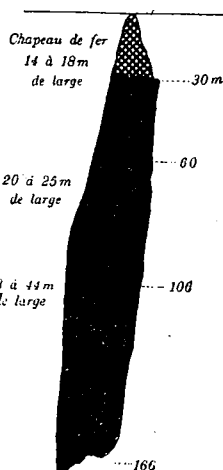


Fig. 36. — Coupe théorique du grand filon.

Cette masse est entièrement formée de pyrite de fer compacte, grenue et non zonée, telle que celle de Rio Tinto ou de San Domingos, mais différente de ces dernières en ce qu'elle est remarquablement pure et exempte de toutes substances étrangères, ce qui est d'une grande importance pour la fabrication de l'acide sulfurique. A peine est-elle mélangée d'une très faible proportion de silice, dont le rôle insignifiant peut être apprécié par ce fait que

¹ Pages 95 et 96. Ces figures ont été exécutées d'après un modèle en relief.

la mine vend commercialement de la pyrite garantie à 50 p. 100 de soufre.

La dureté de cette pyrite est très inégale ; mais c'est un simple phénomène physique et non le résultat d'une composition chimique différente¹, Sur 400 m. de long, au Nord, la pyrite est très dure¹ ; elle est tendre sur 200 m. au Sud.

Au Sud-Ouest, un petit filon, dit *filon dur*, atteint jusqu'à 6 m. de puissance.

Enfin les *lentilles Saint-Antoine* sont : l'une, à l'Est, formée de pyrite de fer ; l'autre, à l'Ouest, séparée de la première par 6 m. de stérile, composée de pyrite à 35 p. 100 de soufre avec quartz et cuivre.

Toutes ces lentilles pyriteuses, dont la fig. 33 indique la disposition générale, forment une traînée Nord-Sud, régulièrement interstratifiée au milieu des chloritoschistes, souvent mélangés de schistes amphiboliques (ou cornes vertes)².

Il est à noter — et c'est un point intéressant, au point de vue des théories génétiques — que le pays ne présente aucune roche éruptive, à laquelle on puisse attribuer un rôle analogue à celui que l'on a supposé pour les gabbros de Norvège et les diabases, porphyrites, ou porphyres quartzifères du Sud de l'Espagne. Il y a bien, à une certaine distance de Sain-Bel, quelques filons de microgranulite N.-W., transversaux à la traînée pyriteuse. Mais, c'est là un fait constant dans tout le Plateau Central français, où ces filons, extrêmement nombreux de tous côtés, ne sont nulle part ailleurs accompagnés de pyrite et l'on ne voit aucune raison pour établir un lien entre ces filons et les venues pyriteuses.

Observations géologiques sur les gisements de Sain-Bel. — Nous allons étudier, maintenant, les divers points de détail qui peuvent présenter quelque intérêt pour la théorie de ces gisements et pour leur comparaison avec ceux d'autres pays.

1° Les *terrains encaissants* des gisements de Sain-Bel sont, je l'ai dit, des chloritoschistes présentant souvent une onctuosité comparable à celle du talc³. La plupart sont absolument blancs, même en profondeur ; quelques-uns sont verdâtres, avec une belle chlorite vert d'émeraude⁴. Au voisinage du gisement, ils sont parfois criblés de cristaux de pyrite⁵. On trouve, au milieu d'eux, des roches vertes compactes, dites *cornes vertes* dans le pays⁶, qui ne sont nullement des roches éruptives comme leur aspect pourrait d'abord en donner l'idée, mais des schistes amphiboliques ou pyroxéniques. C'est, en somme, une formation relativement basique, la formation plus acide des micaschistes sériciteux n'apparaissant que beaucoup plus au Sud, le long du Gier.

2° *L'allure des gisements* de Sain-Bel paraît absolument concordante

¹ Ech. 1324 — 9.

² Ech. 1324 — 1 à 6.

³ Ech. 1324 — 2.

⁴ Ech. 1324. — 3.

⁵ Ech. 1324 — 4 et 5.

⁶ Ech. 1324 — 6.

avec celle des schistes encaissants¹. Le contact est, en général, d'une netteté absolue, comme s'il avait été tout au moins marqué par un accident mécanique postérieur à la formation de l'amas pyriteux, tel qu'un plan de faille. La pyrite massive se termine brusquement par une face, qui souvent est lisse avec des ondulations²: phénomène signalé également à Sulitjelma (Norvège), au Rammelsberg, etc. Cela n'empêche pas que les chloritoschistes au voisinage ne soient constamment criblés de cristaux de pyrite, comme le sont d'ailleurs aussi les porphyres contigus au gîte de Rio Tinto, entre les deux filons Nord et Sud. Le phénomène se présente aussi bien sur l'une des épontes que sur l'autre, entre lesquelles il serait d'ailleurs difficile de délimiter laquelle est le toit, laquelle le mur, puisque le gîte est à peu près vertical (seulement un léger pendage à 80° vers l'Ouest). Pour ceux qui songeraient à une interprétation sédimentaire, il faudrait donc admettre que le dépôt de pyrite dans les argiles destinées à devenir des chloritoschistes s'est produit de même avant et après la formation de la grande masse pyriteuse (car il ne semble pas qu'on ait affaire au résultat recristallisé d'une remise en mouvement secondaire). Cette pyritisation des schistes dure, en général, sur quelques mètres d'épaisseur; elle ne se produit pas, comme souvent dans les gîtes norvégiens, par petites veinules parallèles et également interstratifiées, mais par cristaux de pyrite disséminés dans le terrain, comme peuvent l'être ceux du porphyre contigu à l'amas de Rio Tinto.

Par contre, dans la masse pyriteuse elle-même, il n'y a aucun fragment de schiste intercalé, tout au plus une lentille isolée et tout à fait exceptionnelle.

Dès qu'on est entré dans la pyrite, on la trouve, sur toute son épaisseur qui atteint 40 m., absolument homogène, de grain uniforme et partout de même composition d'une éponte à l'autre. C'est encore un point qui rapproche le gîte de Sain-Bel de celui de Rio Tinto ou, en Norvège, des gîtes de Vaskies à Foldal et de Bossmo, tandis que la plupart des minerais scandinaves et ceux du Rammelsberg sont ordinairement zonés.

3° *La composition du minerai* de Sain-Bel, du minerai marchand extrait de la lentille Saint-Gobain et du grand filon, est remarquablement constante et remarquablement pure. Cette pyrite de fer se distingue par là aussitôt de celles de Rio Tinto et du Rammelsberg, qui contiennent partout des métaux étrangers: d'abord le cuivre auquel elles doivent la majeure partie de leur valeur, puis le plomb, le zinc, le nickel et l'arsenic, dont la teneur varie de 0,25 à 0,50 p. 100, etc.³. C'est ainsi que deux analyses portant sur le minerai du grand filon, l'une à 58 m., l'autre à 121 m. de profondeur, ont donné :

1	Soufre : 53,09 ;	Fer : 46,46 ;	Gangue insoluble : 0,37 ;
2	— : 52,49 ;	— : 46,43 ;	— : 0,90.

avec des traces très faibles d'arsenic et pas de cuivre.

¹ Dans un article de Raby sur Chessy et Sain-Bel (Ann. des Mines, 1833, p. 394), le minerai de cuivre pyriteux est également décrit comme provenant de veines temporaires du terrain encaissant et dirigées suivant ses feuilletts.

² Ech. 1324 — 7.

³ Voir, 1899. Vogr. *Analyses de pyrites espagnoles* (Z. f. pr. G., juillet, p. 248).

Cependant, nous avons vu tout à l'heure, en décrivant l'ensemble des gisements, que le cuivre apparaissait en divers points de la région, soit au Sud dans la lentille Saint-Antoine n° 2, soit à la base de la lentille Saint-Gobain du côté Ouest, soit à la base de la masse du Pigeonnier, soit dans les filons 1 et 2 de la région Nord, soit dans les filons Saint-Gervais qui sont, en même temps, presque blendeux, soit surtout plus au Nord, à Chessy. Ceux de ces points cuivreux qui affleuraient au jour ont tout naturellement attiré l'attention des anciens mineurs et c'est sur eux qu'ont porté les travaux jusqu'à notre siècle. Il est possible que, par un phénomène très ordinaire, le cuivre ait subi là une concentration et un enrichissement dans cette zone superficielle ; mais ce n'est pas ce qui le fait apparaître à 136 m. de profondeur dans la masse du Pigeonnier, à 166 m. de profondeur (avec de la blende), à l'Ouest de la lentille Saint-Gobain. Il est évident qu'il faut voir, dans ces cas, un phénomène primitif, dont il est actuellement impossible de trouver la loi ; car, si le cuivre est souvent à l'Ouest, c'est-à-dire au toit de la zone pyriteuse, ailleurs, il est à l'Est. En général, il paraît plutôt concentré dans les tilons minces, mais ailleurs il se trouve dans les grosses masses. Cette irrégularité même paraît montrer qu'il faut prendre garde de généraliser trop vite, comme on l'a fait parfois, des variations de ce genre, observées pour un seul gisement ou sur un point restreint ; les variations, qu'on a rencontrées dans un sens ici, auraient pu se présenter à côté en sens contraire. La seule loi qui semble réelle dans cet ordre d'idées, est celle de l'appauvrissement moyen en cuivre des grands gîtes Sud-espagnols dans la profondeur : appauvrissement, que nous avons déjà proposé d'interpréter comme un résultat d'actions secondaires tenant à la cémentation¹.

Il est curieux qu'à Sain-Bel, toutes les fois que le cuivre apparaît, la proportion de silice augmente aussi notablement. En même temps, le minerai change de texture. Au lieu d'être grenu et homogène, il devient très nettement zoné, comme peut l'être celui du Rammelsberg par exemple : les pyrites de fer et de cuivre, la blende et le quartz formant des zones alternantes d'inégale couleur². Cela pourrait provenir de ce que, quand la liqueur ou le magma dont le dépôt a formé les amas contenait plusieurs sulfures différents, ceux-ci se sont précipités indépendamment par zones successives. Au contraire, quand le sulfure de fer était seul, ou bien il s'est précipité d'un seul coup, ou, s'il s'est déposé par zones successives, ces zones, formées dans des conditions très égales, n'ont présenté que des démarcations insensibles et peut-être disparues dans une recristallisation ultérieure due au métamorphisme.

En même temps que ces métaux étrangers, la zone Nord de Chessy contient de la barytine, absente à Sain-Bel. On peut se demander si cela ne tiendrait pas à ce qu'elle est encaissée dans des schistes feldspathisés, dont les feldspaths auraient donné cette baryte³.

⁴° En fait de *phénomènes postérieurs à la formation du gisement*, on remarque à Sain-Bel quelques rejets, notamment ce que l'on considère

¹ Page 101.

² Ech. 1324 — 10 à 12.

³ Il existe aussi de la barytine au Rammelsberg dans les grauerze.

comme une grande faille de 120 m. entre la région Nord et la région Sud, la faille-limite du Nord, puis de petits accidents locaux, et des glissements, dont on semble avoir l'indice dans les faces polies des éponges.

C'est, sans doute, par une réaction secondaire que s'est formée, au contact du grand filon, à l'Ouest, une belle poche de calcédoine jaune de 1 à 2 m., englobant des cristaux de pyrite et pénétrant un peu dans la masse pyriteuse¹.

Mais la réaction secondaire la mieux caractérisée est celle qui a formé, sur l'affleurement de divers amas pyriteux, l'ordinaire *chapeau d'oxyde de fer*. Sur les filons de la région Sud, qui affleuraient à peine ou même pas du tout, ce chapeau s'est trouvé naturellement des plus restreints. Ailleurs il a varié de 20 à 40 m. d'épaisseur suivant le relief du terrain (voir fig. 35). Dans la masse du Pigeonnier, où on a pu l'observer facilement, il s'est terminé brusquement à sa base par un plan très net et la pyrite a commencé au-dessous sans transition, seulement un peu plus friable sur les 2 ou 3 premiers mètres du sommet.

Quand le filon est quartzeux, comme c'est le cas pour le filon Saint-Antoine, la limite n'est pas aussi nette, parce qu'il reste, dans la partie altérée, le squelette siliceux avec ses trous d'où la pyrite a disparu et parfois des cristaux de pyrite qui se sont trouvés préservés de l'oxydation.

Exploitation.— L'exploitation se fait par étages de 60 m., divisés en une série de sous-étages de 5 m. composés à leur tour de deux tranches de 2,50 m. de hauteur qu'on enlève: les sous-étages en descendant, les tranches en montant. Les remblayages sont effectués au fur et à mesure. Pour desservir les étages, dont l'enlèvement est subordonné à la production annuelle, on a une galerie inclinée avec chaîne flottante menée parallèlement au filon et dans le stérile. On trace, à chaque niveau, dans l'axe de la section pyriteuse, une grande galerie de roulage, parfois branchée en deux quand la pyrite atteint 40 m. de large et, tous les 20 m., on mène des galeries perpendiculaires qui constituent ensuite le canevas d'un défilage méthodique. L'extraction intensive est menée à raison de près de 1 000 t. par jour. Les mineurs gagnent en moyenne 6,50 fr. par jour. Au jour, la pyrite passe dans des concasseurs et broyeurs, puis descend à Sain-Bel par chaîne flottante. Le maximum d'extraction a été de 320 000 t. en 1903. On a extrait 251 000 t. en 1909, dont 41 p. 100 ont été consommés dans les usines de la C^{ie} de Saint-Gobain.

SÉLÉNIUM²

Se = 79,2

Usages. — Le sélénium est surtout utilisé sous sa forme vitreuse, que l'on obtient en grand par l'effet d'un courant d'eau froide lancé sur le

¹ Ech. 132 — 15.

² 1908. C. R. RIES. *Die elektrischen Eigenschaften und die Bedeutung des Selens* (Berlin). — 1898. VOGT. *Sur la présence du sélénium dans les minerais* (Z. f. pr. G., p. 228); *ibid.*, 1899, p. 29. — 1899. L. DE LAUNAY. *Sélénium* (Min. et Ind.). (Grande encyclopédie.) — 1900. FONZES-DIACON. *Sur un sélénure de manganèse* (C. R., 9 avril).

sélénium fondu dans des lingotières de cuivre. On le vend aussi sous la forme de sélénites alcalins destinés à être réduits dans la fabrication du verre pour donner des verres légèrement colorés en violet. A Paris, la maison Billault fabrique par an une centaine de kilogrammes de sélénium valant 200 fr. le kg.

Le sélénium vitreux a été employé, dans ces dernières années, pour divers appareils de physique, tels que le photophone Bell et la plupart des procédés de télévision. Il a, en effet, la propriété de varier, dans une proportion très forte, de résistance électrique sous l'influence de la lumière. En interposant un fragment dans un circuit, ce sélénium joue donc le rôle d'un cohéreur. Les différents points d'une image transmettront des courants d'intensité différente, qui se traduiront au récepteur par une image semblable.

La même propriété du sélénium a été très ingénieusement utilisée en astronomie pour étudier les phases d'une éclipse avec plus de précision que ne peut le permettre la détermination visuelle¹.

Minerais. — Le sélénium a été découvert, en 1817, par Berzelius, dans les produits de traitement des pyrites de Falun; et nous verrons, en effet, qu'il s'est isolé, dans ce gisement, un séléniure de bismuth et de plomb, associé à l'or dont il facilite le triage : séléniure contenant jusqu'à 14 p. 100 de sélénium. Longtemps on a extrait ce corps uniquement des boues des chambres de plomb et de la poussière des fours de grillage. Parmi les pyrites contenant du sélénium substitué au soufre, on peut citer celles de Theux et d'Oneux (Belgique), de Sulitjelma (Norvège), de Sain-Bel (Rhône), etc.

La teneur en sélénium des pyrites est toujours très faible et n'atteint guère nulle part une moyenne de 1 p. 10.000. A Sulitjelma, en Norvège, où cette teneur est relativement élevée, on l'estime à 1 contre 60.000 de soufre (1,6 kg. de sélénium par 100 t. de soufre). Les pyrites cuivreuses du Mansfeld renferment également, d'une façon constante, du sélénium, qu'on observe après leur grillage. A Rio Tinto on a trouvé, par endroits, des teneurs en sélénium atteignant 0,13 p. 100, sur les mêmes points où existaient les concentrations aurifères et par une association analogue à celle qui vient d'être signalée à Falun.

En moyenne, si la teneur en soufre de l'écorce superficielle est évaluée à 0,06 p. 100, celle en sélénium doit s'écrire avec au moins 8 zéros. Cependant il existe une série de minéraux séléniés proprement dits, où le sélénium joue, en principe, un rôle analogue à celui du soufre. On connaît du soufre natif sélénié (Lipari, Etna, Kilauea), des séléniures de cuivre (Berzéliine et Euchairite), des séléniures de plomb (Clausthalite, Naumannite), de mercure et de plomb (Lehrbachite), des séléniures de bismuth (Freiberg en Saxe, Mexique), un séléniure de manganèse, etc. Enfin la *Zorgite* de la République Argentine (séléniure de cuivre et de plomb), renfermant jusqu'à 31 p. 100 de sélénium et se présentant en quantités relativement notables, arrive à constituer un véritable minerai. On a également reconnu le sélénium dans la molybdénite. Souvent on a vu le

¹ *Emploi du sélénium en astronomie* (La Nature, 16 fév. 1907).

sélénium s'associer avec le tellure : notamment dans les filons d'or de Hongrie (Felsobanya, Kapnik, Nagyag) et dans les minerais d'argent légèrement aurifères de Kongsberg. On connaît à Redjang Lebong (Sumatra) un filon d'or encaissé dans l'andésite, tout particulièrement riche en sélénium.

En dehors de ces associations avec le soufre et le tellure qui correspondent à ses affinités chimiques, les principaux éléments, avec lesquels se combine le sélénium, semblent donc être : d'abord le groupe bismuth, molybdène, cuivre et fer, qui se rattache aux formations stannifères ; puis le groupe plomb et mercure, avec encore un peu de cuivre, qui se rapproche davantage des conditions où nous allons trouver habituellement le tellure. De ces divers séléniures, la zorgite seule est utilisée comme minerai industriel.

TELLURE¹

Te = 127,5

Usages. — Le tellure n'a guère d'applications qu'au laboratoire. Le jour où on lui trouverait un emploi important, il ne serait pas difficile de s'en procurer ; car il en existe, comme nous allons le voir, des minerais relativement abondants. Jusque-là, on se contente d'extraire par an environ 100 à 150 kg. de tellure brut que l'on vend de 100 à 125 fr. le kg.

Minerais. — Le tellure, que, depuis Dumas, on rapproche du soufre et du sélénium en se fondant sur la considération des combinaisons avec l'hydrogène, présente autant de rapports chimiques avec l'arsenic et le bismuth (sans aller, comme on l'a proposé, jusqu'à le rattacher au groupe du platine). Géologiquement, nous le trouvons, comme le soufre et le sélénium, dans certaines pyrites et soufres natifs (soufre rouge du Japon). Nous le rencontrons également en combinaisons, où il est associé avec les mêmes métaux que nous avons déjà eu à signaler à l'occasion du sélénium : le bismuth, le plomb, le mercure et les métaux précieux. Outre le tellure natif, on connaît, en effet, des tellures de bismuth (Bornine, Joséite), un tellurate de bismuth (Montanite), des tellures de plomb (Altaïte), de mercure (Coloradoïte), d'argent (Hessite), d'or (Calavérite), d'argent et d'or (Sylvanite, Petzite), parfois avec mercure (Coolgardite) et toute une série de combinaisons sulfo-tellurées (Nagyagite ; Or et Plomb), ou sulfo-antimonio-tellurées (Blättererz ; Or et Plomb).

Le tellure est un de ces corps que l'on trouve disséminés en traces dans une série de minéraux très complexes, où il reste sans doute à trouver de sa présence une autre explication que celle de combinaisons multiples admises jusqu'ici. On le rencontre même dans la célite, et on le trouverait peut-être plus souvent encore si on avait un intérêt indus-

¹ 1853. LOWE. (J. für pr. Chemie, t. 60, p. 18). — 1873. *Tellurure d'Asie Mineure* (B. S. Ch., t. 20, p. 481). — 1876. SILLIMAN. *Tellurium ores of Colorado* (New Haven, Amer. J. of Sc., 3^e, t. 8, p. 25). — 1878. ROLLAND. (Ann. d. Min., 7^e série, t. 13, p. 159-200). — 188., BEAUGÉY. *Traitement des minerais d'or à Zalathna* (Ann. des M., 8^e, t. 4, p. 486). — 1897. (Z. f. pr. G., p. 72 et 304). — 1901. CARNOT. (C. R., t. 132, p. 298). — 1902. GUTHIER. *Studien über das Tellur* (Leipzig, 96 p.; C. R. Z. f. pr. G., 1903, p. 82).

triel à le chercher. Mais, en outre, il constitue, en association avec l'or, de véritables minerais qui, après avoir passé pour rares, ont été rencontrés ensuite dans deux des plus grands gisements aurifères du monde, où ils forment le minerai principal : à Cripple Creek au Colorado, avec association de fluorine et à Kalgoorlie, en Australie Occidentale, avec du tellure de bismuth. Avant de découvrir ces mines, on avait déjà rencontré abondamment les tellures en Transylvanie, où ils ont été exploités depuis 1873 et à Boulder (Colorado). On connaît également de la hessite à Kara-hissar en Asie Mineure.

Dans la plupart de ces cas, le tellure se rattache à ce groupe dépendant des venues stannifères, où l'on trouve l'or avec le bismuth et où l'on peut trouver aussi molybdène, tungstène, zirconium, cérium, etc. Les boues des chambres de plomb contiennent également du tellure, ainsi que, d'une façon générale, les résidus de traitement du bismuth. Des minerais à 22 p. 100 de bismuth ont donné 1 p. 10.000 de tellure.

L'extraction du tellure se fait surtout en partant de certains minerais d'or à Nagyag et Offenbanya en Transylvanie.

CHAPITRE XVII

CARBONE¹

C = 12

GRAPHITE, DIAMANT, PÉTROLE, BITUME, ETC.

USAGES DES COMPOSÉS DU CARBONE

Le carbone est utilisé : soit à l'état libre, sous une forme cristallisée (graphite et diamant), ou sous une forme amorphe (à provenance organique) ; soit en combinaison avec l'hydrogène, avec plus ou moins d'oxygène, d'azote, de soufre, de chlore, etc. (combustibles minéraux, cannel coals, schistes bitumineux, pétroles, bitume, ozocérite, ambre, asphalte, gaz naturels, composés organiques, etc.) ; soit en combinaison avec l'oxygène (acide carbonique)² ; avec l'azote (cyanogène et dérivés) ; avec le soufre (sulfure de carbone)³ ; avec divers métaux (carbures métalliques, etc.).

Le carbone est l'élément essentiel de tous les composés organiques ; et, à ce titre, il donne lieu à des corps innombrables, dont les usages sont la base essentielle de toute notre existence quotidienne, nourriture, vêtements, etc. Bien que l'on ait fait tomber l'ancienne barrière qui séparait la chimie organique de la chimie minérale et que les composés organiques puissent être, eux aussi, reproduits par synthèse en partant d'éléments purement minéraux, ils n'en constituent pas moins un monde à part, que nous n'avons pas à envisager ici. Nous sommes d'autant plus naturellement conduits à cette élimination que, parmi les éléments minéraux, ou d'apparence minérale, utilisés dans la fabrication de ces composés, les seuls véritablement importants sont les combustibles, base première de la plupart des synthèses industrielles où l'on part du carbone minéral : combustibles, dont l'étude, nous l'avons dit, est réservée pour un ouvrage ultérieur.

Si on reste dans le domaine réservé à la chimie minérale, chacun des divers produits minéraux carburés a un certain nombre d'applications,

¹ On trouvera tous les éléments essentiels d'une étude sur le carbone dans le beau livre si substantiel et original de H. LE CHATELIER, *Leçons sur le carbone*, Dunod, 1908.

² Nous garderons, d'une façon générale, l'ancien nom d'acide carbonique, resté dans la pratique courante pour l'anhydride carbonique. Nous prions, d'ailleurs, une fois pour toutes, qu'on veuille bien nous excuser si, malgré notre désir de moderniser notre langage pour être compris, nous retombons souvent, pour la nomenclature chimique, dans de vieilles habitudes trop enracinées par une étude ancienne.

³ Voir au chapitre du soufre, page 323.

dont il sera question bientôt quand nous étudierons spécialement, l'un après l'autre, le graphite, le diamant, le pétrole, l'asphalte, etc. Nous nous bornons ici à quelques idées très générales.

A ce titre, on doit rappeler d'abord que la principale application du carbone est fondée sur la chaleur dégagée par sa combinaison avec l'oxygène dans sa *combustion*. Et ici, à côté des combustibles minéraux proprement dits, nous rencontrons les gaz naturels hydrocarbonés et le pétrole, qui rentrent dans notre programme.

Suivant le combustible employé, on peut obtenir, depuis 6.000 calories (lignite) jusqu'à 8700 (houille grasse) et 11 000 (huile lourde de Bakou), avec une température de 1900 à 2000°. C'est la récupération de la chaleur employée autrefois par le soleil à dissocier ce même acide carbonique, que reproduisent maintenant nos combustions. Entre les réactions chimiques à dégagement de chaleur, c'est la plus pratiquement utilisable : d'abord, parce que c'est une des seules, pour lesquelles la nature nous fournisse à l'état de liberté un élément nécessairement instable, qui, ailleurs, même lorsqu'il s'est trouvé formé par une opération métallurgique profonde, tend sans cesse à revenir par altération naturelle vers son état définitif; ensuite, parce que les autres combustibles possibles, comme la pyrite par exemple, sont mieux adaptés, par leurs qualités et par leurs défauts, à d'autres emplois. Très spéciaux sont les cas où l'on produit de la chaleur avec des métaux alcalins, de l'aluminium, du soufre, etc.

En regard des combustions lentes, on peut avoir avantage à réaliser des combustions vives accompagnées d'*explosions*, qui, conduisant aux mêmes résultats, ne se distinguent des premières que par la rapidité du phénomène, réalisée grâce à un accroissement de la température et de la pression. Les moteurs à gaz en sont une application.

La seconde grande application des composés carburés est l'*éclairage*. Pendant longtemps, on s'est éclairé uniquement par des procédés qui revenaient tous à provoquer l'incandescence de particules de carbone en suspension dans des gaz. Un progrès récent, mais encore localisé, a consisté à employer, au lieu du carbone, d'autres substances comme l'yttrium, le cérium, l'iridium, etc. dont l'incandescence détermine une lumière plus vive. On continue néanmoins à s'éclairer avec du carbone sous la forme de gaz, huile, pétrole, acétylène, etc.

Parmi ces produits éclairants, nous étudierons bientôt longuement le pétrole.

L'*acétylène*, sur laquelle nous n'aurons pas à revenir, est obtenue avec le carbure de calcium découvert par Moissan : carbure, qui, lui-même, est extrait, par voie électrique, du calcaire en additionnant la chaux d'anhracite très pure. Il nous suffira de mentionner cette utilisation des calcaires quand nous nous occuperons de ces corps au chapitre du calcium.

Parmi les applications accessoires des minéraux carburés, les calcaires servent également à produire, par un simple traitement au four à chaux, l'*acide carbonique* nécessaire dans les soudières et les sucreries. On extrait de la même source l'acide carbonique liquide, dont les usages se développent : commerce de la bière, où l'on met les tonneaux conservés au frais en communication avec des réservoirs d'acide carbonique liquide, qui empêchent tout accès d'air et produisent de la

pression pour remonter la bière au robinet ; fabrication de l'eau de Seltz ; production des basses températures pour les laboratoires, etc.

Les *cyanures* ont des applications assez nombreuses, parmi lesquelles nous retiendrons ici le traitement des minerais d'or par dissolution dans le cyanure de potassium, la galvanoplastie, etc.

Parmi les *carbures métalliques*, il faut faire une place spéciale au carbure de fer Fe^3C , ou cémentite, à 93,33 p. 100 de fer, qui, dissous dans le fer, forme l'élément principal des fontes blanches, avec tendance à se dédoubler en fer et graphite. Les carbures de manganèse, de chrome, de molybdène, de tungstène, de vanadium, sont, comme nous le dirons ailleurs, de plus en plus utilisés en sidérurgie.

Le *carbure de silicium*, ou *carborundum*, SiC est très employé, concurremment à l'émeri, en raison de sa dureté. Il constitue également un excellent produit réfractaire, utilisé, sous forme d'enduit, avec addition d'argile et de silicate de sodium, dans les fours ou creusets. On le prépare en faisant passer un courant très intense dans un mélange de charbon et de silice. Son prix est d'environ 1 fr. le kg.

RÉSERVES ABSOLUES EN CARBONE. — LE CARBONE DES ROCHES, DES MERS, DE L'AIR, ETC.

Le carbone tient une place importante dans la nature, surtout par le nombre exceptionnel, l'importance pratique et les caractères spéciaux de ses composés avec l'hydrogène et l'oxygène, mais aussi, par la proportion relative de son poids total dans l'écorce terrestre, comparé à celui de beaucoup d'autres éléments chimiques, quoiqu'à cet égard, comme nous l'avons déjà fait remarquer¹, on ait une certaine tendance instinctive à exagérer et que cette proportion soit très inférieure à celle de l'oxygène, du silicium, de l'aluminium, etc. L'importance du carbone doit, nous l'avons vu, se restreindre, selon toute apparence, aux conditions qui dominant à la périphérie des astres ; mais ce sont ces conditions périphériques qui nous intéressent le plus, comme ayant donné lieu à l'activité vitale ; et, dans les manifestations de celle-ci, on sait que le rôle du carbone devient tout à fait prédominant.

Teneur en carbone des roches. — Si nous envisageons d'abord les sources de carbone mises à notre disposition d'une façon absolue et indépendamment des facilités ou des avantages particuliers que peut présenter leur utilisation, le minerai de carbone de beaucoup le plus abondant que nous connaissions est le carbonate de chaux.

Théoriquement, la calcite renferme 43,70 p. 100 d'anhydride carbonique, ou 12 p. 100 de carbone. Un mètre cube de calcaire moyen, qui pèse 2.500 kg., contient 300 kg. de carbone. Or, nous avons cherché ailleurs à évaluer par divers procédés la quantité de calcaire existant à la surface de la Terre²

¹ Pages 48 et 43.

² *La Science géologique*, p. 632 et suiv. On a parfois porté l'épaisseur moyenne des calcaires à 175 m. : mais j'ai dit pourquoi ce chiffre me semblait se réduire au tiers.

sous la forme de sédiments et celle intervenant dans la composition des roches cristallines qui forment seules l'écorce profonde. J'ai estimé alors que les calcaires existant à la surface pouvaient représenter une couche moyenne de 60 m., répartie sur toute l'étendue de la Terre. En chiffres ronds, cela fait 18 t. de carbone au mètre carré. Si l'on franchit cette pellicule sédimentaire, beaucoup plus mince qu'on ne l'a dit parfois, mais néanmoins intéressante, on trouve une écorce de roches cristallines, dont la teneur moyenne en carbone est de 0,10 p. 100 à toutes les profondeurs abordables pour nous. Cela représente, sur chaque mètre de surface, 3 t. par km. de profondeur. Ce carbone est associé dans les roches avec une teneur en chaux de 4,80 p. 100, qui correspondrait à 8 p. 100 de calcaire ou 1 p. 100 de carbone¹. Un dixième seulement de la chaux des roches peut donc être au maximum à l'état de combinaison calcaire; et l'existence de carbone libre ou de carbures d'hydrogène réduit même un peu ce chiffre. Le reste de la chaux est en silicates de chaux plus ou moins complexes et ne se transforme ultérieurement en calcaires dans la sédimentation que par un emprunt de carbone à l'autre grande source naturelle de cette substance, l'atmosphère.

On peut supposer, avec de grandes vraisemblances, que la teneur primitive en carbone de l'atmosphère, sous la forme de carbures d'hydrogène, puis d'acide carbonique, a dû être, dans les premières phases de l'histoire du globe, très supérieure à ce qu'elle est aujourd'hui et que ce carbone a été peu à peu fixé par la vie pour aboutir à la forme calcaire, vers laquelle le ramènent maintenant des cycles constants.

Malgré sa présence dans ces représentants de magmas profonds que sont pour nous les météorites, le carbone paraît être, dans notre globe, un élément périphérique; et, lors même que nous le trouvons dans les roches, il y a lieu de se demander dans quelles proportions ce carbone y provient de la refusion des sédiments, à laquelle on est en droit d'attribuer une part dans la composition actuelle des roches cristallines. Ces roches peuvent, à leur tour (et c'est la phase du cycle qui attire le plus notre attention) restituer des carbures d'hydrogène, provenant de leur carbone emprisonné².

Teneur en carbone des mers. — Une forte proportion de carbonates dissous à la surface de la Terre a fini par aboutir à la mer. On sait que les mers, supposées réparties sur les 510 millions de km² qui constituent la superficie terrestre, y occuperaient une épaisseur moyenne de 2 500 m. à 3 000 m. Or l'eau de mer tient, pour 1 000 parties : 33,5 à 37,5 de sel dissous, dont 0,345 p. 100 de CaCO³, ou, par m³, environ 124 gr., correspon-

¹ Il y a lieu de remarquer que cette teneur en carbone, malgré son importance pratique pour nous, qui nous fait y attacher une attention spéciale, est très faible à côté de la proportion de quelques éléments : surtout de l'oxygène qui entre pour 47,10 p. 100 dans la croûte terrestre, du silicium (27,90), de l'aluminium (8,10), du fer (4,70), etc.

² En décembre 1909, des expériences très discutables de Ramsay (voir un résumé dans la *Nature*, 3 janvier 1910) ont semblé montrer que le carbone se produisait par transmutation de divers métaux sous l'influence du radium. Il est inutile de dire que, si un tel fait était démontré, il en résulterait, pour toutes nos théories relatives à la géologie de ce corps, un grand changement. Les expériences en question semblent cependant montrer que ce carbone naissant se transformerait aussitôt en acide carbonique par décomposition de l'eau. On n'expliquerait alors ainsi que l'anhydride carbonique et non les carbures d'hydrogène.

nant à 14,9 gr. de carbone. Les mers représentent donc 38 et 45 kg. de carbone par mètre carré superficiel sur toute la Terre ¹.

Teneur en carbone de l'atmosphère. — Enfin l'atmosphère renferme 0,0003 p. 100 de son volume d'acide carbonique, soit 0,6 gr. d'acide carbonique ou 0,16 gr. de carbone par m³. La hauteur de l'atmosphère, calculée d'après la pression barométrique, serait de 8.000 m. en supposant la pression uniforme sur toute la hauteur. On trouve ainsi 13 kg. de carbone par m² superficiel.

En résumé, on voit que, par ordre de grandeur, les roches cristallines, sur une épaisseur de 15 km. minima, où l'on peut supposer leur composition relativement uniforme, donnent, par mètre carré superficiel, 45.000 kg de carbone; puis les calcaires 18.000 kg.; les mers 45 kg.; l'atmosphère 13 kg.

La plus grande partie du carbone que l'on peut supposer avoir existé à la périphérie de la Terre dans sa phase cosmique est donc aujourd'hui fixée dans son écorce silicatée. Celle-ci peut, il est vrai, en restituer une certaine quantité sous forme de fumerolles hydrocarbonées; mais le travail de la sédimentation, qui combine sans cesse la chaux, mise en liberté par l'érosion de ces roches, avec de l'acide carbonique emprunté à l'air, et (dans une mesure il est vrai très faible) le travail de l'activité organique, doivent tendre à diminuer la teneur en acide carbonique de l'air beaucoup plus vite qu'elle n'augmente.

Végétation. Combustibles minéraux. — Le travail de la végétation, qui a pour effet d'emmagasiner de l'énergie solaire par la décomposition de l'anhydride carbonique contenue dans l'air en présence de la chlorophylle des plantes, aboutit à la création constante de cellulose (C⁶H¹⁰O⁵). On a calculé qu'il s'utilisait ainsi environ 0,04 p. 100 des calories versées par le soleil. Le résultat pratique, si important pour nous à tous égards, est néanmoins très faible en chiffres absolus. C'est peut-être 8 à 10 gr. de carbone qui se fixent par m² et par an. Le retour constant de ce carbone à son état d'acide carbonique, qui est la forme stable, fait qu'en définitive, il subsiste, au grand maximum, 20 gr. de carbone organique par m² superficiel.

Enfin la grande source industrielle de carbone, sont les combustibles minéraux, qui représentent des calories solaires mises de la même manière en réserve pendant la longue durée des temps géologiques. On peut compter sur au moins 4.000 milliards de tonnes de combustibles minéraux utilisables (sans compter toutes les couches trop minces pour être jamais exploitées). Pour 510 millions de km², cela fait, en moyenne, un peu moins de 8 kg, ou (à raison de 70 à 80 p. 100 de carbone²), 5 à 6 kg. de carbone par m² superficiel de la Terre. Ce chiffre est encore très considérable si on le compare à la teneur actuelle de l'atmosphère, dont il représente environ la moitié, ou à la fixation actuelle de carbone par la végétation.

¹ Les analyses de Schloesing conduiraient, pour le carbone des mers, à un chiffre notablement supérieur de 75 kg. par m² superficiel.

² Voir L. DE LAUNAY. *La conquête minérale*, p. 328, où j'ai donné le détail de cette évaluation.

³ Un lignite contient de 70 à 75 p. 100 de carbone; une houille grasse, 84 à 90; un anthracite jusqu'à 95. Mais, avec des combustibles pratiques, il faut tenir compte des cendres.

Les ressources en pétrole sont insignifiantes à côté de celles en houille. On produit par an 40.000.000 de t. de pétrole et c'est beaucoup espérer que d'admettre la possibilité de prolonger cette production pendant un siècle. Quant aux autres formes naturelles du carbone, comme le graphite, le diamant, etc., elles entrent, dans le total précédent, malgré toute la valeur que nous sommes amenés à leur attribuer, pour des chiffres complètement négligeables.

MINÉRAIS DE CARBONE

Ce que nous avons examiné jusqu'ici, ce sont les réserves absolues en carbone ; mais, suivant une remarque presque évidente, déjà faite plus haut, de ces réserves, à peu près illimitées, on n'utilise que la fraction relativement faible qui, soit par sa concentration, soit par sa forme, soit par d'autres conditions industrielles, présente des avantages particuliers. On ne songe pas à extraire le carbone des roches plus que celui des mers ou de l'air. Ce que l'on peut consommer de calcaire pour se procurer de l'acide carbonique ou de l'acétylène mérite à peine d'être signalé. En dehors des combustibles minéraux et des composés organiques laissés ici de côté, les vrais minerais de carbone que nous allons avoir à examiner sont : ou le carbone cristallisé sous ses deux formes du graphite et du diamant¹ ; ou les combinaisons hydrocarburées, avec oxygène, azote ou soufre, dont les principales formes à étudier pour nous sont les schistes bitumineux, les pétroles, le bitume, l'ozocérite, l'ambre, l'asphalte et les gaz naturels.

A. — GRAPHITE

Nature du graphite². — Le carbone pur, difficile à dégager de ses combinaisons, a été regardé par Berthelot comme un état limite de carbures d'hydrogène de plus en plus condensés, de plus en plus appauvris en

¹ Nous employons à dessein l'expression de minéral, inusitée dans ce cas, pour rapprocher le carbone, comme les autres métalloïdes, des métaux proprement dits, que l'on en sépare, dans les habitudes de l'enseignement, par une démarcation, utile sans doute, mais trop absolue.

² J'ai eu l'occasion d'étudier la question du graphite dans un mémoire intitulé. *Notes sur la Théorie des gîtes minéraux. La Géologie du graphite* (Ann. d. Min., janvier 1903). — Voir encore : BERTHELOT. *Théorie des corps pyrogénés* (Ann. Ch. et Phys., 4^e série, t. 9, p. 475) ; *Recherches sur les états du carbone* (Ann. Ch. et Phys., 4^e série, t. 19, p. 392) ; — et les nombreux travaux du même savant sur la synthèse directe de l'acétylène par l'hydrogène agissant sur le carbone volatilisé dans l'arc électrique (C. R., t. 54, p. 640, 1862 ; Ann. Ch. et Phys., 3^e série, t. 67, p. 64, 1863 ; *la Synthèse chimique*, 1887), sur les acides humiques, etc... — MOISSAN. *Etude des différentes variétés du graphite. Etude du graphite extrait d'une pegmatite* (C. R., t. 119, p. 976, 1894 ; t. 121, p. 538, 1895) ; *Sur les différentes variétés de carbone* (Ann. Ch. et Phys., juillet, août 1896). — SCHUTZENBERGER et BOURGEOIS. *Recherches sur le carbone de la fonte blanche* (C. R., t. 80, p. 911) ; 1890, PAUL et LÉON SCHUTZENBERGER. *Sur quelques faits relatifs à l'histoire du carbone* (C. R., t. 114, p. 774). — 1891, BECK und LUZZI. *Ueber die Bildung von Graphit bei der Contactmetamorphose* (N. Jahrb. f. Min. und Geol., t. 2, p. 28). — 1893, LUZZI. *Sur le graphite* (D. ch. Ges., t. 24, p. 4805, et t. 25, p. 214) ; *Ueber Graphitoid* (B. u. H. Z., 52 p. 11-13,). — 1910, STUTZER. *Ueber Graphitlagerst.* (Z. f. pr. G. p. 10).

hydrogène. Ce carbone libre peut à son tour prendre trois états allotropiques de plus en plus denses : carbone dit amorphe, graphite, diamant, dont les caractères physiques sont entièrement différents, et dont l'identité chimique ne se manifeste qu'après combinaison avec un autre corps, surtout avec l'oxygène, par la combustion. La différence de densité est particulièrement caractéristique. Elle passe de 1,8 pour le carbone amorphe, à 2,255 pour le graphite et 3,51 pour le diamant.

La forme dite amorphe, que nous n'aurons pas à étudier, s'obtient, avec la plus grande facilité, par une décomposition pyrogénée, mais toujours en partant d'une matière organique. Quand on la réalise au moyen d'une matière minérale, — par exemple, comme nous le verrons plus tard, en distillant en vase clos les schistes bitumineux de Menat, — c'est que les hydrocarbures de ces schistes ont eu directement une origine organique.

La variété graphite est, de son côté, une forme fréquente, mais dont la production semble impliquer en principe une haute température. Toutes les fois que l'on soumet du carbone à une forte chaleur, c'est du graphite qui se produit. Ce graphite, comme nous allons le voir, peut se rencontrer dans la nature à l'état de minéral tout formé. Mais ici l'origine organique, n'est plus à beaucoup près constante. On a du graphite produit par métamorphisme de couches contenant des hydrocarbures ; mais on a aussi du graphite n'ayant jamais passé par la forme organisée et résultant de la réduction probable d'un hydrocarbure minéral, ou, simplement, de la cristallisation directe d'un peu de carbone renfermé dans les magmas ignés.

Enfin, pour le diamant, malgré les théories végétales que l'on voyait autrefois reparaître de temps en temps, l'origine minérale semble partout prouvée, bien qu'il ait pu se produire aussi, dans quelque circonstance tout à fait exceptionnelle et dont nous n'avons pas connaissance, la cristallisation en diamant de carbone ayant passé par la forme organique. Cette distinction est du reste sans intérêt : la similitude absolue des produits réalisés par l'activité organique avec ceux qu'on peut obtenir par voie purement minérale étant aujourd'hui bien prouvée.

Propriétés physiques et chimiques. — Le graphite, connu également sous les noms de mine de plomb et de plombagine¹, est, à l'état pur, du carbone cristallisé en lamelles d'apparence hexagonale, présentant un clivage facile et donnant par broyage des paillettes très minces. Sa densité est de 2,255. Sa chaleur de combustion pour formation d'acide carbonique, rapportée à un poids atomique de 12 gr., est de 94,82 cal-kgr. ; soit 7910 cal par kg. Pour passer du carbone amorphe au graphite, il faut 2,83 cal-kgr. ; du graphite au diamant 0,50.

Le graphite se produit dans d'assez nombreuses réactions calorifiques. Il en intervient dans la composition des charbons électriques,

¹ On a été très longtemps à reconnaître la vraie nature du graphite, d'abord confondu avec la molybdénite et la galène (d'où son nom). En 1827, il était encore présenté comme un carbure de fer à 8 p. 100 de fer. Plus tard, on a beaucoup discuté sur le rôle de l'hydrogène que l'on y rencontre fréquemment. Enfin Moissan admettait l'existence de diverses variétés de graphite, tandis que, pour H. Le Chatelier, il en existe un seul quand on élimine les impuretés.

obtenus en calcinant vers 1600° des pâtes composées de goudron, noir de fumée et charbon de cornue. On fabrique, d'autre part, du graphite artificiel par un procédé calorifique indiqué plus loin.

Pratiquement, les graphites naturels contiennent tous des proportions d'impuretés, qui sont seulement de 0,2 à 3 p. 100 dans les variétés exceptionnellement pures de Ceylan ou de Sibérie, mais qui, plus généralement, atteignent 10 à 30 p. 100 et dépassent 50 p. 100 dans les graphites inférieurs, comme ceux de Bavière, de Moravie, du Cumberland. Commercialement, on exige, pour les qualités supérieures, 90 p. 100 de carbone. Les impuretés, dont nous croyons inutile de reproduire l'analyse¹, contiennent tous les éléments des roches et des terrains, dans lesquels le graphite est englobé.

Chimiquement, le graphite se caractérise par l'action du mélange d'acide nitrique fumant et de chlorate de potassium, qui donne, avec lui, de l'oxyde graphitique jaune, tandis que le diamant n'est pas attaqué et que le carbone amorphe se transforme en produits gazeux ou solubles dans l'eau. Cet oxyde graphitique, chauffé entre 200 et 300°, déflagre en donnant une poudre noire très volumineuse, dite acide pyrographitique. D'autre part, l'acide nitrique fumant produit, sur certains graphites, une transformation, que l'on manifeste en chauffant ce corps ensuite à 180°. Avec ces graphites, dits foisonnants, tels que ceux dont le gisement primitif se trouve, comme nous le verrons, dans des granulites ou des terrains primitifs, (Ceylan, Ticonderoga aux États-Unis, Buckingham au Canada, Bamle et Skutterud en Norvège, etc.), il se produit une augmentation de volume qui atteint le quintuple du volume primitif. Ce sont, pour Luzzi², les graphites proprement dits : les graphites non foisonnants étant dits graphitites³.

Des graphites foisonnants sont obtenus artificiellement quand le carbone est dissous dans des métaux réfractaires, comme le platine, pour lesquels la saturation ne se produit qu'à une haute température. Le refroidissement brusque de la fonte de fer en produit également. Parmi les graphites foisonnants naturels, quelques-uns, comme ceux de la roche diamantifère du Cap ou des météorites, peuvent se rattacher à ce dernier cas. On ne voit pas, d'autre part, l'indice d'une température élevée dans le cas des pegmatites à graphite, ni des cipolins graphiteux.

Les graphites non foisonnants sont, au contraire, ceux obtenus par volatilisation du carbone au moyen de l'arc électrique ou par transformation calorifique d'autres carbures, et la plupart des graphites naturels, y compris les gros amas de Sibérie et le graphite inclus dans le granite de l'Ariège : ce qui sur peut-être en évidence le rôle du métamorphisme calorifique exercé sur des hydrocarbures d'origine quelconque dans la formation de ceux-ci.

D'après Moissan, ce foisonnement pourrait être attribué au brusque déga-

¹ Voir : MOISSAN. *Chimie minérale*, t. 2, p. 224.

² 1891. LUZZI. (Ber. D. chem. Ges., t. 24, p. 4805 et t. 25, p. 214).

³ Généralement, le *graphite* proprement dit, foisonnant, est nettement lamellaire ; le *graphitite* est en agrégats compacts. On a encore proposé de distinguer, sous le nom de *graphitoïde*, les variétés les plus compactes, sans éclat, brûlant à une température moins élevée et généralement impures (hydrogène ou azote). L'existence de ce dernier type est loin d'être démontrée.

gement de gaz résultant de l'attaque d'un peu de carbone amorphe, interposé dans le graphite. Certains graphites, tels que ceux de Borrowdale (Cumberland), renferment, en outre, des gaz emprisonnés et retenus avec une grande énergie, que l'on recueille en chauffant au rouge dans le vide. Sur 4 cm³ de gaz ainsi produits par 1 cm³ de graphite, l'air occupait 0,7 cm. et le reste était formé d'hydrogène et d'hydrocarbures.

Un autre point, auquel on a attaché récemment de l'importance, est la présence fréquente, et depuis longtemps connue, de l'azote dans certains graphites : présence qui, si elle ne prouve nullement, comme on l'avait d'abord prétendu, l'origine organique de ceux-ci, constitue cependant un rapprochement avec les matières organisées. Des analyses, faites sur la suggestion de Rosenbusch ¹, ont trouvé de l'azote dans une matière noire graphiteuse du Rensch gneiss dans la Forêt-Noire, puis dans le graphite de Ceylan, etc. On s'est parfois demandé aussi s'il n'y avait pas là un indice de combinaisons cyanurées assez problématiques.

Usages du graphite. — Les principales propriétés du graphite, qui contribuent à ses applications pratiques, tiennent à sa structure lamellaire, et à sa réfractibilité. Par sa cristallisation en lamelles, il tend à se disposer en lames toutes orientées de même et réfléchissant ensemble la lumière sur les corps où on l'a frotté. Cela produit un éclat métallique, qui le fait employer pour noircir les objets de fonte (grilles, plaques de foyer, etc.). Les traces noires brillantes qu'il laisse sur le papier amènent son emploi en crayons. D'autre part, la même cause détermine en lui une certaine plasticité, analogue à celle de l'argile, qui est mise à profit dans la fabrication de divers objets en graphite moulé, comme les creusets à fondre l'acier. On utilise, en même temps, dans ce cas, sa résistance aux hautes températures. Les creusets de graphite sont fabriqués en incorporant une certaine quantité d'argile pour augmenter à froid la solidité des objets moulés et surtout pour fournir à haute température un fondant capable de produire un enduit vernissé, qui empêche ensuite l'oxydation du graphite.

Enfin toujours la même cause fait que l'on se sert du graphite pour enduire les moules de fonderie, et il en résulte une onctuosité, utilisée dans les lubrifiants, cambouis, etc.

Suivant les usages auxquels on destine le graphite, on exige de lui telle ou telle propriété.

Les variétés les plus pures (valant un millier de francs la tonne) sont employées à la fabrication de *crayons supérieurs* (graphite de Ceylan et de Sibérie). Les gros morceaux sont simplement découpés en baguettes, qu'on introduit dans les rainures pratiquées sur des fragments de bois. Les petits fragments pulvérisés et la poussière de sciage sont auparavant agglomérés en briquettes par mélange avec de la gomme ou de la colle de poisson et compression ²

¹ 1899. ROSENBUSCH. *Stud. im Gneissgebirge des Schwarzwaldes* (Mitt. bad. geol. Landesanst.), — Cf. 1896. VON ERDMANN. *Ueber das Vorkommen des Stickstoffs im Urgestein* (Ber. deutsch. chem. Ges., t. 29, 1710). Comparer la présence de l'azote dans le grisou.

² Le centre principal de fabrication des crayons est à Nuremberg, où vingt-six usines, employant 5.500 personnes, produisent par an 250 millions de crayons, pour une

Pour la fabrication des *creusets réfractaires*, on peut employer des graphites relativement impurs, mais contenant seulement certaines sortes d'impuretés. La proportion d'argile nécessaire (qu'on incorpore au besoin) est d'un tiers. Mais il faut qu'il n'y ait que de l'argile, pas de chaux qui donnerait des silicates fusibles, surtout pas de fer qui produirait en outre des colorations ocreuses. La texture du graphite a également son importance : les variétés écailleuses sont bonnes pour les creusets, les variétés grenues pour les crayons.

Le graphite de Passau en Bavière est renommé pour les creusets. Ceux-ci (dits de mine de plomb) servent, en particulier, à l'Hôtel des monnaies pour opérer l'alliage de cuivre et d'or des monnaies d'or.

Comme corps onctueux, le graphite entre dans la fabrication des *cambovis*, obtenus en l'incorporant à des huiles ou à des graisses.

Dans le même ordre d'idées, on l'insuffle, à l'état de poudre fine, sur les parois internes des *cylindres de machines soufflantes* pour adoucir le frottement du piston et rendre la garniture plus étanche. Il faut alors de très bon graphite, bien onctueux.

On garnit les *moules de fonderie* avec du graphite de dernier ordre. (Raffinades ordinaires valant environ 50 fr. la tonne).

Enfin on en utilise aussi pour la galvanoplastie, le lissage des poudres, etc.

Voici quelques prix, n'ayant pour but que de marquer la valeur relative des diverses qualités.

PRIMA. — (Envoyée en Angleterre pour la fabrication des crayons)	600 à 700 fr. la tonne.	
SECONDA. — (Envoyée en Angleterre pour la fabrication des crayons)	500	
Raffinade extra	{ pour les machines soufflantes. . . 300 { pour la fabrication des creusets. . 250 { pour les matières noircissantes. 100 à 200	
Raffinade ordinaire pour moules de fonderie . .		50

En 1910, le graphite de Ceylan était coté à New-York depuis 330 fr. pour le graphite pulvérulent, jusqu'à plus de 1000 fr. pour le graphite en gros morceaux¹.

Graphite artificiel². — Le graphite artificiel est fabriqué en grand par un procédé dû à l'inventeur américain du carborundum (siliciure de carbone), Acheson. On chauffe de l'antracite cendreux tenant de 10 à 20 p. 100 de cendres, dans une grande chambre en briques, au centre de laquelle on a disposé un noyau constitué par des charbons conducteurs de l'électricité, dans lequel on fait passer un courant intense. C'est l'appareil qui sert à la fabrication du carborundum en employant un mélange de charbon et de

valeur totale de 10 millions. — La France est obligée d'importer le graphite (270 t., valeur 675.000 fr.), autrefois d'Angleterre, aujourd'hui d'Italie et d'Allemagne : une tentative d'exploitation, faite en 1835 près de Besançon, ayant échoué ; mais elle exporte des crayons Conté, dont le noir est obtenu par un procédé spécial.

¹ Les cours sont cotés en cents par pound (lb).

² 1910. Brochure de l'International Acheson Graphite Company.

silice. Vers 2000°, on obtient le carborundum. Pour avoir le graphite, on pousse davantage la température. La chaleur est suffisante pour vaporiser toutes les cendres minérales, en sorte qu'on obtient un graphite très pur, enfermant à peine quelques millièmes de cendres.

Le graphite artificiel, étant tout particulièrement pur, est surtout utilisé à la fabrication des électrodes, des creusets et des tubes employés en électro-metallurgie.

Postérieurement, en 1906, le même auteur a réussi à produire une sorte de graphite colloïdal (defloculated) qu'il nomme aquadag et qui, en suspension dans l'eau, traverse tous les papiers filtres. Cet aquadag, mélangé à de l'huile, donne un lubrifiant (oildag), qui est, paraît-il, d'excellente qualité.

Un autre procédé, dû à Girard et Street, consiste à placer, dans la chambre de chauffe d'un four électrique à courant alternatif, une pièce à graphiter faite de charbon pur additionné de 2 p. 100 de matière étrangère (fer, silice, acide borique).

Production et statistique. — Il existe, dans le monde, deux centres principaux de production du graphite : Ceylan pour les qualités supérieures ; l'Autriche (Bohème et Moravie) pour les qualités inférieures. Après quoi viennent les États-Unis et l'Italie. Ceylan exporte, par an, de 25 à 35 000 t. de graphite, dont les 94 à 98 centièmes ont une teneur supérieure à 90 p. 100, tandis qu'en Autriche et Bavière on n'arrive guère à isoler plus des 25 centièmes à la même teneur. Les États-Unis fournissent du graphite analogue à celui de l'Autriche et le Piémont du graphite tout à fait inférieur.

D'après les chiffres de 1906, *Ceylan* a produit 36 000 t. de graphite, auxquelles s'ajoutent 2 600 t. venant du continent indien : le tout compté à un prix moyen de 456 fr. En 1908, on est tombé à 22 200 t., plus 2 900 t. de l'Inde.

En 1891, la production de l'*Autriche* était seulement de 21 346 t. et se décomposait ainsi : Bohème (district de Budweiss) 12 683 t. (7 400 t. à Schwarzbach, chez le prince de Schwarzenberg, 2 850 t. à Mugrau, 2 417 t. à Krumau) ; Moravie, 4 388 t. ; Styrie (Leoben), 3 332 ; Basse-Autriche, 943 t. Le tonnage est monté peu à peu à 32 ou 34 000 t. entre 1899 et 1901, puis 49 000 en 1907, 40 700 en 1909. Par contre, en 1900 et 1901, cette production était estimée, en moyenne, 65 fr. la t. Son prix n'était plus que de 41 fr. en 1906.

Le district bavarois de Passau, qui est la prolongation des gites autrichiens, produit (1906) 4 000 t. à 61 fr.

Aux *États-Unis*, les chiffres de 1892 étaient seulement de 585 t., dont 230 t. de graphite raffiné à Ticonderoga (N.-Y.) ; le reste dans le Michigan et en Pennsylvanie. On a eu : 1 900 t. à 457 fr. en 1900 ; 560 en 1908 ; 2 570 t. à 550 fr. en 1907. Il est vrai qu'il faut ajouter, à ces 2 570 t. de graphite minéral, 3 090 t. de graphite artificiel.

L'extraction du *Piémont* a beaucoup monté aussi : 1 735 t. à 13 fr. 41 en 1890 ; 5 650 à 10 fr. en 1897 ; 9 720 en 1900 ; 10 300 à 29 fr. en 1901 ; 12 900 t. à 29 fr. en 1908.

Le *Mexique* a atteint 3 200 t. en 1907 pour redescendre à 1 100 en 1909.

Il faut signaler encore, comme régions accessoires : le *Canada* avec 1 100 t. en 1900, 1 700 t. en 1901, 525 t. à 158 fr en 1907, 783 t. en 1909 : le

Japon (390 t. à 403 fr. en 1900, 160 à 450 fr. en 1907) ; la *France* (125 t. à 50 fr. en 1907). Le district de Borrowdale, en Cumberland, et la mine Alibert, en Sibérie, ne produisent plus rien depuis longtemps. L'Australie et la Suède se bornent à quelques tonnes.

Le petit tableau suivant résume ces chiffres :

TABLEAU 15. PRODUCTION MONDIALE DU GRAPHITE

	Ceylan	Autriche	Italie	Bavière	Etats-Unis	Mexique	Canada
1891.	32 000	21 346	1 735		585		
1898.	24 000	33 062	6 435	4 593	824	1 360	1 107
1901.	22 000	34 000	10 300	7 000	1 800	760	1 700
1907.	33 000	49 000	11 000	4 000	2 000	3 200	525
1908.	26 200	44 000	12 900	4 800	1 560	1 070	227
1909.	26 000	40 700	11 600	4 900	2 750	1 100	780

On peut ajouter que la fabrication du graphite artificiel, organisée depuis quelques années aux chutes du Niagara, acquiert de plus en plus d'importance : 182 t. à 85 fr. en 1899 ; 1 125 t. à 52 fr. en 1901 ; 3 090 t. en 1909. La moitié de ce graphite est utilisé à la fabrication des électrodes.

GISEMENTS DE GRAPHITE.

L'origine du graphite dans ses gisements touche à nombre de questions intéressantes. Le graphite est, en effet, l'un des éléments principaux dans cette longue série de minéraux carburés, qui va du pétrole ou de l'asphalte au diamant en comprenant les combustibles, et dont chaque corps a suscité les deux mêmes théories adverses : l'une organique, l'autre inorganique. Comme nous l'avons annoncé déjà, les deux origines semblent, dans le cas du graphite, se rencontrer concurremment et nous allons nous attacher à les distinguer.

Pour traiter cette question, il y a, on le conçoit, un réel intérêt à comparer les propriétés des graphites naturels à celles de produits artificiels, dont l'origine est parfaitement connue. C'est, semble-t-il d'abord, le moyen, tout indiqué, d'arriver à déterminer à quelle température tel ou tel graphite minéral a dû se former, ou plutôt à quelle température maxima il se sera trouvé porté un instant par le métamorphisme. La distinction des graphites foisonnants ou non foisonnants après traitement à l'acide azotique, dont il a été question plus haut, a paru spécialement utile à envisager. Il ne semble pas toutefois qu'elle donne tout ce qu'on avait espéré en déduire. Car on trouve côte à côte, dans le groupe foisonnant, des graphites provenant d'un bain métallique à très haute température avec d'autres, pour lesquels la température a dû être faible, et, suivant son mode de production, la fonte de fer donne du graphite foisonnant ou non. De plus l'on peut partir d'hydrocarbures très divers, aussi bien minéraux qu'organiques, de pétrole comme de végétaux¹, on peut les soumettre

¹ Le graphite des Alpes est certainement, comme on le verra plus loin, le produit d'une action calorifique sur la houille : par exemple, au Chardonnnet, le long d'une roche éruptive. De même, Karpinsky, étudiant le gisement des houilles de Fadina,

à des réactions extrêmement variables ; dès lors qu'à un moment donné la température aura été suffisante, ou que la réaction, moins intense, aura été suffisamment prolongée, le produit fixe, le corps limité, auquel on arrive toujours, est un graphite non foisonnant, et la nature de ce graphite, ne dépendant guère que de ces conditions de température et de temps, ne renseigne, par suite, en aucune façon sur l'origine première.

Géologiquement, nous distinguerons les groupes de gisements suivants :

I. *Graphite cristallisé en milieu basique.* — Météorites, roches diamantifères du Cap.

II. *Graphite dans des roches acides.* — Pegmatite d'Amérique, granites de l'Oural, syénite néphélinique de Sibérie, granulites de Ceylan.

III. *Graphite des gneiss de Bavière, de Bohême, des Etats-Unis, etc.*

IV. *Graphite de Styrie et des Alpes*, résultant de combustibles métamorphisés.

Les deux premiers groupes ont certainement une origine minérale, ou, tout au moins (car il est impossible de préjuger les cycles antérieurs de la matière) ont certainement passé, avant de cristalliser, par l'état inorganique. On y trouve les deux cas extrêmes que nous rencontrerons également pour le diamant : milieu basique et milieu acide, impliquant peut-être des modes de cristallisation différents. Le troisième groupe accuse l'influence d'un métamorphisme igné, mais laisse en suspens la question de l'origine organique ou inorganique (la première des deux hypothèses semblant toutefois plus vraisemblable). Enfin, les graphites de Styrie et des Alpes seront étudiés comme exemple de graphites incontestablement dus à des réactions calorifiques exercées sur des matières végétales.

I. *Graphite cristallisé en milieu basique.* — Parmi les graphites naturels, nous rencontrons d'abord ici des cas très nets de graphites foisonnants, attribuables à la cristallisation du carbone dans un bain de fonte, ou de scorie, brusquement refroidi. Tels sont les graphites des météorites et ceux des roches diamantifères du Cap, dont les conditions de gisement seront étudiées un peu plus loin au chapitre du diamant.

Les carbures métalliques se forment aisément à haute température et se dissocient en présence de l'eau pour donner : les carbures de métaux alcalino-terreux, de l'acétylène ; les carbures d'aluminium, du formène. Il suffit donc de faire intervenir les traces de carbone, que renferment toutes les roches¹, pour obtenir des hydrocarbures, susceptibles ensuite de se

sur le versant Est de l'Oural (J. des Mines, 1880, t. I, p. 87. — Cf. *ibid.*, 1887, n° 7) y a reconnu du graphite d'origine végétale et produit par métamorphisme. Beck et Luzzi (N. J. f. Min., 1894, t. 2, p. 28) ont prouvé également que le granite de Donner, en Saxe, avait transformé en graphite la matière charbonneuse de certains schistes siluriens.

¹ Les travaux de A. Gautier (C. R., 1901), paraissent avoir montré que, dans les granites, c'est-à-dire dans ce qu'on pourrait appeler les scories de la première fusion interne, il restait assez de traces de carbone, soufre, etc., pour donner naissance, en présence de la vapeur d'eau à 250°, dans une sorte de deuxième ou troisième fusion

dissocier. La cristallisation directe du carbone est également possible, surtout dans les milieux basiques qui doivent, selon toute apparence, dominer en profondeur.

II. Graphite dans des roches acides. — Comme association du graphite aux roches acides, Moissan a signalé un exemple curieux et assez exceptionnel de pegmatite graphitique à graphite foisonnant. C'est une pegmatite d'Amérique, qui renfermait jusqu'à 13 p. 100 de graphite, à l'état de cristaux lamelleux ayant souvent plus de 1 cm. de diamètre. Ces cristaux de graphite avaient été consolidés antérieurement au quartz et au feldspath, qui s'étaient moulés sur eux. Peut-être avaient-ils commencé par se former en profondeur à haute température. Après quoi, dans la montée filonienne, une dissolution de carbonates alcalins avait précipité sur eux la pegmatite. Je ne sais si cette pegmatite provenait du gisement de Ticonderoga (N.-Y.), où l'on trouve, en effet, des pegmatites à graphite foisonnant et quelquefois du graphite avec de la calcite.

D'après de Charpentier¹, le granite du Port de la Quorre, dans l'Ariège, renferme également des nids de graphite, mais ici non foisonnants (graphitite), avec tourmaline, etc.

Dans les monts Ilmen, Auerbach (1856) et Rose (1872) ont décrit des concrétions de graphite au milieu d'un granite pauvre en mica, auxquelles Vernadsky et Schklarewsky ont consacré une étude².

Selon ces savants, ce graphite, qui ne peut avoir une origine pseudomorphique, forme des concrétions centrées, sphéroïdales, à structure radiée, avec inclusions de minéraux ordinaires du granite (orthose, quartz, muscovite, biolite).

Nous rattacherons encore au même phénomène³ l'existence de diamant, de graphite et d'hydrocarbures dans un certain nombre de filons quartzeux ou pegmatoïdes, qui, eux-mêmes, peuvent être dus à une dissolution de silice dans l'acide carbonique liquide, précipitée en bloc par un

aux divers gaz des fumerolles volcaniques, y compris l'hydrogène, ainsi que cela a pu se produire plus abondamment au contact direct des magmas basiques de première fusion. Suivant lui, cette eau pourrait être empruntée à l'eau de carrière des granites eux-mêmes. Pour les carbures d'hydrogène, il y a lieu de remarquer que les carbonates calcaires des granites, dont la réduction a donné ces gaz dans les expériences en question, sont, en partie, des produits d'altération secondaire, dus à la fixation de l'acide carbonique de l'eau par la chaux des plagioclases; mais les granites intacts de la profondeur, dans la constitution desquels parait toujours entrer une part notable de sédiments refondus, devraient également contenir de ce chef des éléments carburés, quand bien même on admettrait que les zones plus centrales et non scoriacées n'en contiennent pas.

¹ In LACROIX. *Miner. de la France*, t. 1, p. 358.

² 1900. Bulletin des Natur. de Moscou, n° 3, (en russe, avec résumé français).

³ Les anciens gisements de Borrowdale, en Cumberland, qui autrefois ont fourni du graphite très pur, mais que l'on a abandonnés depuis plus d'un demi-siècle, et que l'on connaît par suite fort mal, rentrent dans ce groupe d'après d'anciennes descriptions un peu sujettes à caution [OËYVHAUSEN und DECHEN. *Ueber die Graphitgrube zu Borrowdale* (Karstens Archiv., 1830, 2, 285)]. Weinschenk mentionne, d'après ce travail, des veines de calcite, sidérose et quartz avec nids de graphite dans une roche porphyrique (?). Un auteur anglais, Davies, parle de veines graphitiques dans des grès et schistes primaires, seulement traversés par ces veines porphyriques, ou plutôt porphyritiques : ce qui semble plus vraisemblable.

phénomène de sursaturation ou de décompression. C'est ainsi que j'ai recueilli en Scandinavie, de nombreux exemples de ce genre, relatifs aux hydrocarbures filoniens et constaté que ces filons, traversant de l'oligiste, l'avaient réduit en magnétite¹. Il y a donc eu là des hydrocarbures en milieu très acide. Nous aurons également l'occasion d'insister sur l'association fréquente des hydrocarbures avec le cinabre filonien en divers pays. A. Lacroix cite un cas du même genre pour le quartz des filons stanifères de la Villeder, qui a renfermé du graphite en quelque abondance. Ailleurs, le gisement du diamant dans les pegmatites, — possible d'après les observations de Gorceix au Brésil, — témoignerait, si l'observation est exacte, d'inclusions carburées dans ces pegmatites. Enfin, certains gisements de graphite dans des gneiss granulitisés peuvent être une conséquence de la granulitisation ; mais comme, là, il a pu y avoir également simple métamorphisme de sédiments carburés, nous les laisserons de côté en ce moment, pour revenir tout à l'heure sur ce dernier côté de la question quand nous nous occuperons des gisements de Ceylan et de Passau.

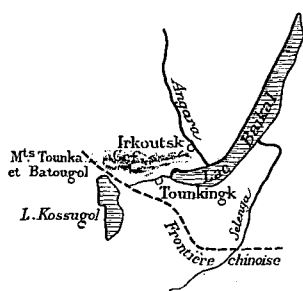


Fig. 37. — Carte montrant la position du gîte de graphite Alibert.

Graphite de Sibirie². — On peut rattacher à cette catégorie de gisements, les graphites Alibert. Ces gisements célèbres, exploités par Alibert de 1848 à 1858, et, depuis lors, abandonnés, se trouvent à l'Est de la Sibirie, par 118° 22' de long. E. et 52° 21' 19" de latitude N., à 2.258 m. au-dessus de la mer, à l'Est des Alpes de Kitoï, sur la rive droite du haut cours du Botougol (ou Batougol), affluent de

la Khonechone, qui se jette dans la Biélaïa. (Fig. 37).

Le graphite (graphite et graphitite de Luzzi) y forme des nids et amas irréguliers au milieu d'une syénite néphélinique à gros grains (de 1 à 2 cm), dans laquelle les silicates ferrugineux (amphibole, augite, biolite) jouent un rôle subordonné. Il est toujours associé à ces minéraux ferrugineux, soit enveloppé par eux, soit les enveloppant. Le sphène se présente en beaux cristaux, généralement revêtus de graphitite. Les gros amas sont, au moins pour la plupart, composés de graphitite non foisonnant (donc probablement attribuable à une réaction calorifique).

Ce massif de syénite, accompagné de filons latéraux (fig. 38), traverse des couches de gneiss, schistes argileux, siliceux et graphitiques et des bancs de calcaires cristallins, dont quelques enclaves au milieu de la syénite sont riches en graphite et graphitite.

Le graphite de ce gisement a une densité de 2,235 ; le graphitite, qui

¹ Une opération de synthèse m'a permis de reproduire le phénomène en chauffant de l'hématite avec du pétrole en vase clos à 250° ; il s'est produit ainsi, sur une partie des grains d'hématite, un enduit de fer magnétique (C. R., 11 février 1903).

² Voir *Richesses minérales de l'Asie*, p. 524. — 1896, HELMACKER. *Graphitvorkom. in Russland* (B. u. H. Z., 29). — JACZEWSKI. *Le gisement de graphitite de J.-P. Alibert, au sommet du rocher Botogolsky* (russe. avec rés. fr.).

domine de beaucoup, comprend des parties de densité variable entre ce chiffre et 2,412.

Selon Jaczewski, le graphite de la syénite aurait été emprunté aux schistes traversés, eux-mêmes parfois graphiteux comme on vient de le voir, et son origine première serait organique. Mais cette affirmation semble bien difficile à concilier avec l'existence, dans cette syénite, de gros blocs graphiteux dépassant 30 à 40 cm. et contenant jusqu'à 97 p. 100 de carbone : blocs, qui n'ont aucun équivalent dans les schistes. Il aurait

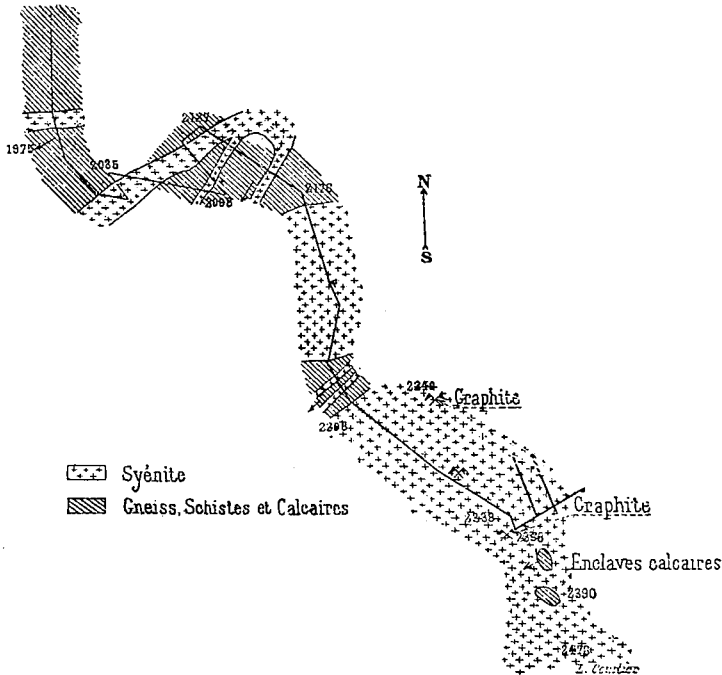


Fig. 38. — Carte géologique du gisement de graphite Alibert, d'après Jaczewski.

tout au moins fallu expliquer par quelle réaction aurait pu se produire une semblable concentration, l'hypothèse d'une distillation du graphite proprement dit supposant une température de four électrique assez peu vraisemblable. Le graphite de Sibérie semble donc, jusqu'à nouvel ordre, d'origine profonde et inorganique. Il en est très probablement de même du graphite de Ceylan que nous allons étudier.

Graphite de Ceylan¹. — Les gisements de Ceylan sont, comme on l'a vu

¹ 1860. P. TENNENT. *Ceylon, an account of the island*. London. — 1860. RICHTOFEN. *Bem. über Ceylan* (Zit. d. D. geol. Ges., t. 12, p. 523). — 1887. SANDBERGER. *Beitrag zur Kenntniss des Graphits von Ceylan* (N. J. Min., t. 2, 12). — 1889. LACROIX. *Cont. à l'étude des gneiss à pyroxène*, chap. VII. *Ceylan et Salem* (Bull. Soc. Fr. Min., t. 12, 282). — 1889. WALTHER. *Graphitgänge im zersetzten Gneiss von Ceylon* (Z. d. D. geol. Ges., t. 12, p. 359). — 1896. ZIRKEL. *Ceylon* (Vortrag geh. im Ver. f. Erdk. zu Leipzig

plus haut¹, aussi intéressants par leur valeur industrielle que par leurs conditions géologiques. Ils fournissent des quantités exceptionnelles de graphite pur à 90 p. 100 et telles qu'on n'en avait auparavant trouvé qu'en Sibérie.

La description géologique des roches de Ceylan, donnée par E. Weinschenk, concorde, si l'on tient compte des divergences entre les deux classifications pétrographiques allemande et française, avec celle que A. Lacroix a publiée dans sa thèse sur les gneiss à pyroxène et roches à wernérite.

On est là en présence d'un remarquable complexe de terrains cristallophylliens, assimilable, dans l'ensemble, avec ceux de la Bretagne, du Plateau Central, de la Saxe, de la Norvège, etc. La série comprend : 1^o comme termes acides, des gneiss à biotite et sillimanite avec andalousite exceptionnelle, des leptynites grenatifères (granulites allemandes) et des gneiss granulitisés à microcline, au milieu desquels les intrusions de

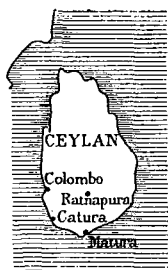


Fig. 39. — Carte des graphites de Ceylan.

granulites, au sens français du mot (c'est-à-dire de granites à mica blanc), paraissent fréquentes ; 2^o comme termes basiques, des gneiss pyroxéniques et amphiboliques, des gneiss à anorthite (parfois avec wernérite) et des cipolins dolomitiques, souvent riches en chondrodite, spinelle, etc.. Les venues intrusives de granulites et de pegmatites à minéraux (pierre de lune, etc.) sont certainement fréquentes dans cet ensemble, et l'on a pu, avec quelque vraisemblance, leur attribuer un rôle dans la formation du graphite.

On peut seulement se demander dans quelle mesure les leptynites, au milieu desquelles se trouve, comme nous allons le voir, le graphite, sont des gneiss granulitisés, ou, au contraire, des sédiments calcaires feldspathisés, comme j'en ai depuis longtemps émis l'hypothèse pour les roches analogues du Plateau Central.

Les principaux gisements de graphite exploités se trouvent dans la région S.-W. de Ratnapura à Matura, qui, reliée par des chemins de fer à Colombo, est plus facilement accessible ; mais l'Est, fort peu exploré, paraît en renfermer aussi (fig. 39). On cite : *Ragedara*, près de Kurunegala, point terminus d'un embranchement, qui quitte, à Polgehawela, la grande ligne de Colombo-Kandy ; puis *Ampe*, *Pushena*, *Humbuluwa*. L'exploitation en est généralement superficielle et faite sans aucun plan ; elle s'enfonce pourtant, par endroits, jusqu'à 100 m.

Ces gisements, ordinairement concentrés dans les leptynites grenatifères

am 5. Febr. 1896). — 1897. G. MELZI. *Sopra alcune rocce dell'isola di Ceylan* (Rend. Ist. lomb. Sc. lettr. (2), 30). — 1898. M. DIERSCHE. *Beitr. z. Ken. der Gesteine und Graphitvorkommnisse Ceylons* (J. d. geol. Reichs., t. 48, p. 234). — 1900. ERNST WEINSCHENK. *Die Graphitlagerstätten der Insel Ceylan* (Abh. der k. bay. Ak. der Wiss., II, t. 171, München). — 1900. COOMARA SWAMY. *On Ceylon rocks and graphite* (J. geol. Soc., London, 25 p.).

¹ Page 378. L'extraction de Ceylan était environ de 700 tonnes en 1850, de 6.000 en 1870, de 1.000 en 1880, de 45.000 en 1890, de 26.000 en 1909. Le prix moyen de la tonne était de 375 francs en 1880, 420 en 1886, 456 en 1907.

¹ Voir : 1889. L. DE LAUNAY *Roches primitives de la feuille de Brives* (B. Ser. Carte géol., no 4.

compactes et massives, mais recoupant également des pyroxénites, se composent, paraît-il, d'un véritable système de filons, associés avec des veines de quartz et présentant, en moyenne, une certaine orientation vers le centre du massif; dans ces filons très irréguliers, on trouve, tantôt des poches de plusieurs tonnes, tantôt de très étroites veinules. Le graphite, ayant mieux résisté à l'altération que les roches feldspathiques, apparaît dès les affleurements, mais alors terni et de peu de valeur; à 5 ou 6 m. de profondeur, il reprend son éclat. C'est, d'habitude, un minéral foliacé à grands éléments et très pur; ces éléments, comme dans la plupart des filons de graphite, sont normaux aux épontes: ils atteignent 20 cm. et laissent parfois entre eux un vide, comme dans un filon géodique, ou sont réunis par du graphite de formation postérieure. Les éléments normaux aux épontes se recourbent souvent dans l'axe ou sur les salbandes, et se rassemblent en une masse compacte; certains fragments doivent à ces zones un aspect de bois carbonisé, qui leur a fait attribuer, sans aucune raison, une origine organique. Des mouvements postérieurs ont parfois

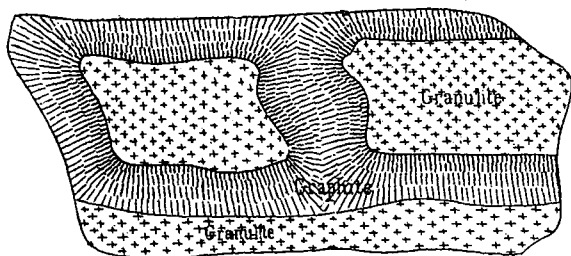


Fig. 40. — Echantillon de graphite de Ceylan, d'après Weinschenk.
(Dimensions : 15 × 25 cm.)

réouvre les filons au milieu et parfois ont amené des déviations le long des épontes. Enfin, l'on a des apparences de stockwerk, où des veines d'un centimètre cimentent des morceaux de leptynite. Tel est, notamment, le cas sur le croquis ci-joint (fig. 40). Le graphite y affecte une structure radiée autour de granulite éruptive. Ces veines graphiteuses traversent nettement les éléments de la leptynite, tels que le quartz et le feldspath, ou, ailleurs, ceux de la pyroxénite. Il est du reste, frappant que la leptynite elle-même ne soit pas graphiteuse, et que l'on passe brusquement du filon de graphite à la roche stérile.

Comme corps accessoires, on a signalé l'abondance du rutile, de grands cristaux d'augite et de la pyrite en concrétions faciles à trier du graphite: ce qui contribue à la valeur de celui-ci. Enfin, un minéral, qui, au premier abord, semble s'accorder moins naturellement avec l'idée d'une origine filonienne profonde sans remise en mouvement secondaire, c'est la calcite, dont les cristaux englobent souvent des concrétions rondes d'environ 1,5 cm. à 2 cm. de graphite très bien cristallisé, ainsi qu'on le constate également à Ticonderoga, et qui paraît là à peu près contemporaine de la formation du graphite¹.

¹ Voir, p. 136, sur le rôle de la calcite dans les filons.

Pour E. Weinschenk, qui est extrêmement affirmatif dans ses conclusions, il ne fait pas de doute que de semblables filons graphiteux soient dus à un dégagement interne de fumerolles. Son opinion paraît très plausible d'après l'ensemble des faits qu'il a décrits et l'on peut tout au moins affirmer avec lui que l'allure actuelle du graphite n'a rien là de sédimentaire. Il se fonde, toutefois, sur la présence de certains éléments oxydés, tels que le kaolin et la nontronite, dans une zone très mince au contact immédiat du filon, pour affirmer que ce dégagement n'a pu s'opérer en milieu réducteur de carbures d'hydrogène et faire intervenir des composés d'oxyde de carbone, ou carbonyles. Cette dernière conclusion ne paraît nullement nécessitée par l'existence des minéraux altérés, et surtout du kaolin, qui, pour nous, est dû, comme nous le verrons mieux plus loin¹, à un phénomène secondaire et superficiel, tout à fait indépendant de la formation du graphite.

III. Graphites de Bavière et de Bohême. — Nous abordons maintenant une catégorie de gisements pour lesquels l'origine inorganique, admise jusqu'ici dans cette étude, devient beaucoup plus problématique et que la majorité des géologues rattachent, en général, sans hésitation, au groupe des graphites produits par le métamorphisme des combustibles, dont il sera question plus tard. Ce sont les lentilles et veines interstratifiées dans le terrain primitif, dont on connaît des représentants un peu partout dans les couches cristallophylliennes (Plateau Central, Bretagne, Scandinavie, Etats-Unis, Canada, etc.), mais dont le développement a surtout pris des proportions industrielles aux confins de la Bavière et de la Bohême (Passau, Schwarzbach, etc.). La théorie interne a été développée par Weinschenk, à l'occasion de ce dernier district, avec des arguments dont quelques-uns sont très séduisants et d'autres contestables. Il semble, en l'état actuel de nos connaissances, difficile de se prononcer².

Les gisements graphiteux dont il s'agit³, les plus considérables de beau-

¹ Voir au chapitre du Kaolin.

² Nous allons discuter, pour les gisements de Bavière, l'origine filonienne qui, d'après E. Weinschenk, n'est pas douteuse sur place. Quand même cette conclusion serait admise, il ne faudrait l'étendre aux autres gisements du même genre qu'après examen de chaque cas particulier.

³ Les principaux travaux de E. WEINSCHENK sont : 1896 et 1900. *Zur Kenntniss der Graphitlagerstätten* [Chem.-Geol. St. (3 fasc. in-4°, München, Bayer Akad., — 1898, *Ueber die Graphitlagerst. der Umg. v. Passau und die Erzlag. am Silberberg bei Bodenmais* (Glückauf, B. u. H. Wochenschrift, n° 45, Essen). — *Ueber einige Graphitlag.* (Z. f. pr. G. 1897, p. 286; 1900, p. 36 et 174). — *Ueber den Graphit Kohlenstoff und die gegenseit. Bez. zw. Graphit, Graphitit und Graphitoid* (Z. f. Krist., etc., 28, 294). — *Der bayerische Wald zw. Bodenmais und dem Passauer Graphitgebiet* (Anlass der XLIV Vers. d. D. geol. Ges., München, 1899). — 1900, *Mémoire sur l'histoire géologique des graphites* (C. R. Cong. géol. p. 447 à 557). — 1903, *Weit. Beob. über die Bildung des Graphites, speziell mit Bezug auf den Metam. der alpinen Graphitlagerstätten* (Z. f. pr. G., janv.). [Cet article est surtout une réponse à HÖRNES : *Der Metam. der obersteirischen Graphitlagerstätten* (Mitt. naturw. Ver. Steierm., 1909, p. 90)]. — En dehors de Jaczewski, dont j'ai cité plus haut le travail sur la Sibérie, tout à fait opposé aux idées de E. Weinschenk, la théorie de ce savant a été également combattue par Redlich et J.-L. Barvir : H. BARVIR. *Nekulik ukazek z mikroskopické struktury...* (Sitzber Böhm. Akad. Wiss., 1897, n° 52). — D'après un résumé de E. Weinschenk lui-même, le travail de Barvir s'appuierait sur des raisons très contestables :

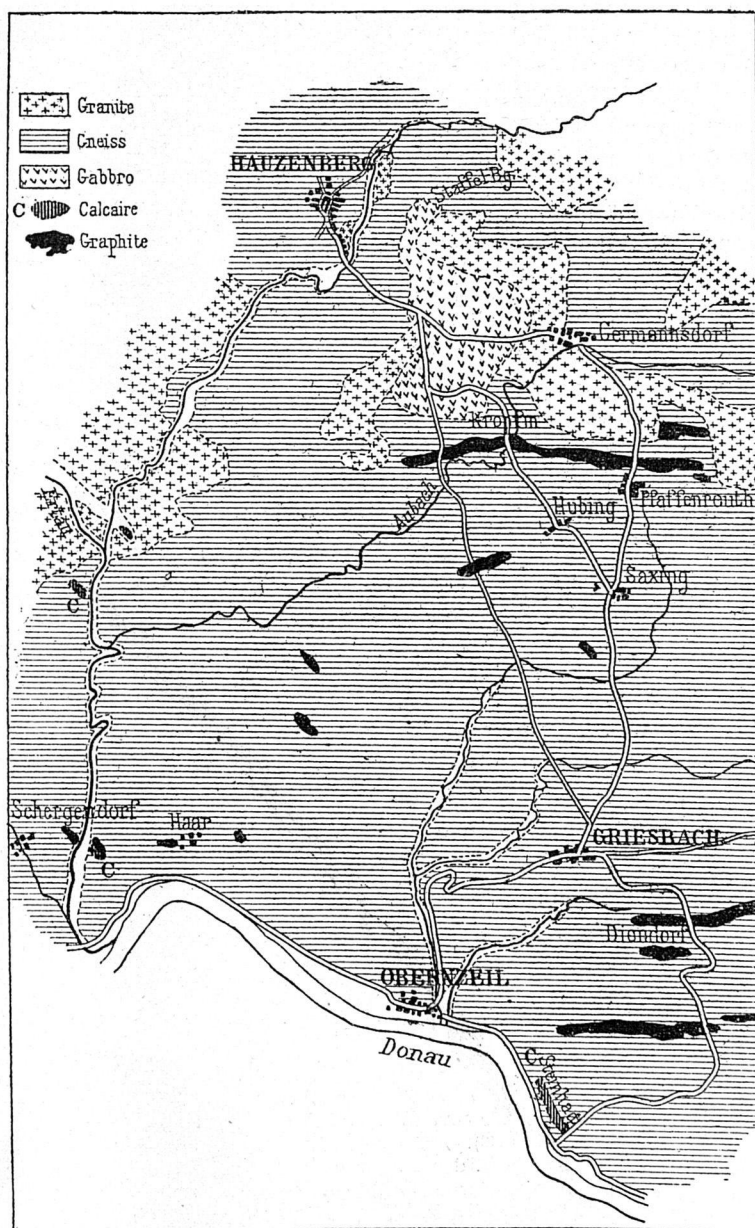


Fig. 41. — Carte géologique du district à graphite de Passau, d'après C.-W.-V. Gümbel. (Passau est un peu plus à l'Ouest sur le Danube.) Echelle au 1/100 000^e.

présence de soi-disant traces organiques, qui sont des concrétions de pyrite et de silicates ; cristallisations de pyrite, considérées comme une preuve d'origine organique, parce qu'on les retrouve aussi dans la houille, etc.

coup en Europe, sont situés dans la région Est de la Bavière, près de Passau (fig. 41), et dans la partie immédiatement contiguë de la Bohême, à Krummau, Schwarzbach, etc.¹ (fig. 42).

On est là sur un massif hercynien, très analogue à celui du Plateau Central et rappelant également, par beaucoup de caractères, le massif plus ancien de la Scandinavie : massifs, qui, tous deux, présentent aussi des gisements de graphite². Les terrains dominants, dont il suffira de rappeler la nature, appartiennent à la série des gneiss et micaschistes, avec leptynites, amphibolites, diorites, cipolins, etc. ; les gneiss sont souvent riches en cordiérite. Il existe, en outre, quelques roches intrusives plus récentes : gabbros, microgranulites et porphyrites (ces dernières, comme en France, sur des dislocations carbonifères en rapport avec de petits lambeaux houillers). Un dôme de granite est, au Nord de la région de Passau, très voisin de certains graphites, que l'on a pu supposer en relation avec lui (fig. 41). Mais, au Sud du même district, vers Griesbach, le graphite est déjà à 8 km. des granites. A Krummau, cette relation n'apparaît pas non plus et semble donc très douteuse d'une façon générale, d'autant plus que, d'après E. Weinschenk lui-même, le granite, ni en Bavière ni en Bohême, ne contient de graphite³.

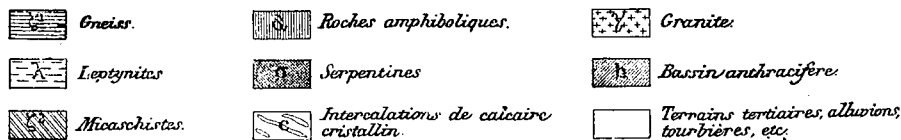
Le graphite, ou plutôt le schiste graphiteux, forme, au milieu de ces terrains, une série de veines, de lentilles, de bancs toujours nettement interstratifiés, dans lesquels le carbone apparaît mélangé avec les autres minéraux de la roche et sans occuper plus d'un quart à un tiers au maximum du poids total. Ce graphite, sauf dans un cas exceptionnel, à Krummau, n'est pas foisonnant (graphitite) et semble, par suite, avoir sub un métamorphisme calorifique.

En Bavière, on observe de très nombreuses lentilles apparaissant par groupes et s'arrêtant court pour reparaître plus loin ; en Bohême, les couches sont beaucoup plus continues et souvent plus épaisses jusqu'à 16 m., quoiqu'il leur arrive de s'amincir à quelques centimètres. Par exemple, à Schwarzbach, dans l'exploitation Schwarzenberg, il y a trois couches, dont la médiane donne des graphites très purs à près de 85 p. 100 de carbone, pouvant être utilisés directement après triage à la main, tandis que les deux autres couches sont très impures. Outre les

¹ Voir encore 1863. v. LIPOLD. *Die Graphitlager nächst Swojanow in Böhmen* (J. K. Geol. Reichs. Wien., t. 13, 261). — 1872. K. PAUL. *Das Graphitvor. im Paltenthal in Steiermark* (Verh. K. K. Geol. Reichs. Wien., 169). — 1873. E. TIETZE. *Ueber das Graphitvor. von Kunststadt in Mähren* (Verh. K. K. Geol. Reichs. Wien., 38). — 1885. WOLDRICH. *Ueber eigenthümliche Graphitconc. von Schwarzbach in Böhmen* (Verh. K. K. Geol. Reichs. Wien., (399)). — 1897. FR. KRETSCHMER. *Die Graphitablagerung bei Mährisch-Altstadt-Goldenstein* (J. der K. K. geol. Reichs. Wien., p. 21 à 56), article attribuant le graphite au métamorphisme de contact et dynamique. — 1898. V. TAUSCH. *Ueber ein Graphitwerk nächst Kollowitz bei Budweis in Sud-Böhmen* (Verh. d. K. K. geol. Reichs., n° 7, p. 182). — 1910. BREITSCHOPF. *Das Graphitwerk in südl. Böhmen* (Oest. 3. f. B. u. H. 12. 19 et 26 mars). — Cf. coll. n° 1778 à l'Ecole des Mines.

² 1902. LEO. *Graphitv. in der schw. prov. Norrbotten* (B. u. H. Z. p. 26-27). En France, Elie de Beaumont a étudié au Val d'Andlau dans les Vosges, un gisement de graphite dans les gneiss (Expl. carte géol., p. 310 et 314).

³ Ce géologue a cru remarquer, à Passau, un rapport entre la richesse en graphite ou sa compacité et le rapprochement du granite ; mais, en Bohême, où se trouvent les gites les plus importants, on est déjà loin du granite.



----- Lignes des principaux affleurements de graphite et de calcaire.

Fig. 42. — Carte géologique des gites de graphite de Bohême. Echelle au 1/216 000.

lits graphiteux proprement dits, beaucoup de roches de la région contiennent du graphite ; surtout les gneiss très micacés et les cipolins, qui,

même lorsque le graphite n'apparaît pas, ont une odeur fétide, évidemment due à la présence d'hydrocarbures.

Le graphite est très fréquemment au contact de ces cipolins, où le métamorphisme a développé : spinelle, pargasite, chondrodite, wollastonite, chlorite. Entre le graphite et le cipolin, on remarque de nombreuses intercalations d'une sorte de syénite augitique très particulière, à structure souvent pegmatoïde, riche en sphène et contenant des houppes de graphite, avec de la passauite (minéral du groupe de la skapolithe).

Les observations, sur lesquelles E. Weinschenk a appuyé sa thèse d'une origine interne, ont été faites, pour la plupart, dans le district de Passau, qui s'y prête mieux; mais, à part quelques différences de détail,

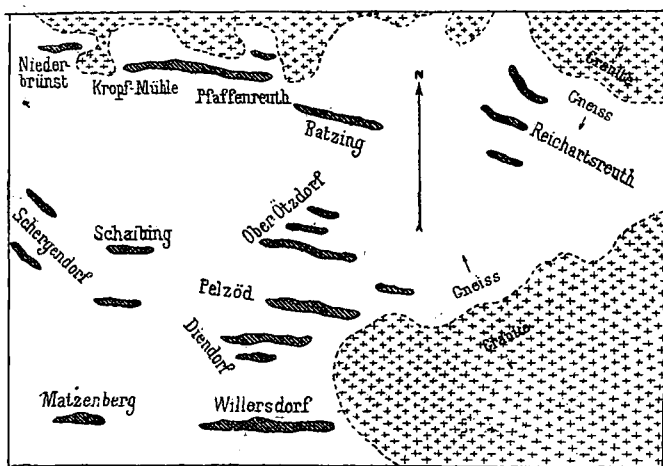


Fig. 43. — Plan des lentilles graphiteuses de Pfaffenreuth, d'après Weinschenk, Echelle au 1/146 000.

elles s'appliquent aussi aux gisements de Bohême. Ces observations sont, nous l'avons dit, d'une valeur très inégale.

La plus caractéristique est, assurément, comme nous l'avons déjà remarqué, le fait que le graphite se présente, en certains points, notamment au Nord du district (c'est-à-dire dans le voisinage du granite), aux mines de Winkelacker et Hinterwiese, entre Pfaffenreuth et Leitzersberg (fig. 43), sous la forme d'innombrables petites veinules, constituant une sorte de brèche à ciment graphitique au milieu d'un gneiss, lui-même graphitique par endroits (fig. 44)¹. Ce gisement, qui offre donc quelques analogies avec celui de Ceylan, présente un graphite spécial en grosses houppes incrustant de véritables filonnets, dont l'origine nécessite tout au moins un déplacement des matières carburées, postérieur à la sédimentation.

On remarque, d'autre part, que, dans l'ensemble, les parties graphi-

¹ On observe à Passau des blocs coupés par des filons de graphite à lamelles normales aux parois, eux-mêmes bifurqués. Les fragments de gneiss, ainsi enveloppés de graphite, sont peu graphiteux.

teuses sont, avant tout, les parties disloquées des roches et des bancs, ou les contacts de terrains inégalement résistants, alors qu'il n'y a pas de graphite dans les roches compactes, et ce fait se poursuit jusque dans le détail ; le graphite semble s'être constamment introduit dans les fissures ou les clivages des cristaux et rechercher les minéraux qui lui offrent le plus de semblables interstices : d'où proviendrait (d'après E. Weinschenk) son rapprochement ordinaire avec la biotite.

En examinant au microscope un gneiss à graphite, on voit enfin parfois des feuillettes très minces de graphite alterner avec des feuillettes de mica, dont ils épousent toutes les inflexions ; d'autres suivent exactement le contour compliqué de deux minéraux, puis brusquement pénètrent dans l'un d'eux¹.

De semblables faits ont été invoqués comme une preuve que les composés carburés (hydrocarbures ou carbonyles), auxquels, en toute hypothèse, serait dû le graphite, auraient été introduits dans les sédiments devenus gneissiques, postérieurement à leur dépôt primitif. Peut-être, en effet, y a-t-il eu, pendant le processus du métamorphisme, qui a dû transformer des terrains variés en gneiss, micaschistes, etc., des dégagements hydrocarburés, plus ou moins en relation avec les liqueurs alcalines carbonatées, dont la cristallisation a granulitisé les argiles, calcaires, etc... Cette idée d'un apport profond et émané des magmas granitiques vient assez naturellement à l'esprit pour les sulfures métallifères, si abon-

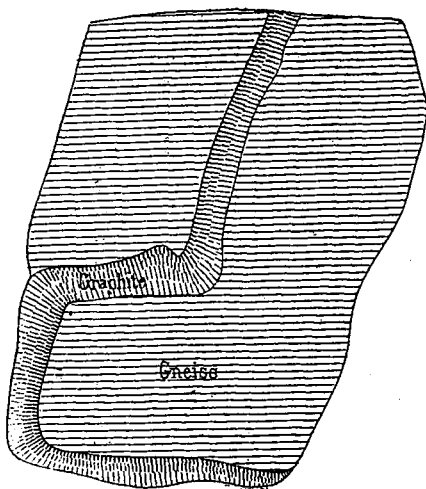


Fig. 44. — Bloc de gneiss graphiteux de la région de Passau, d'après Weinschenk.

¹ Pour E. Weinschenk, le graphite de Bavière aurait la même origine profonde que celui de Ceylan ; mais, rencontrant, au lieu de roches massives, des terrains disloqués ou schisteux, il y aurait pénétré un peu partout, et se serait plus exceptionnellement localisé dans des cassures. Ce savant m'a communiqué une observation faite à Amberg sur des argiles réfractaires, transformées en schistes graphiteux dans le fond d'un haut fourneau : par conséquent, par introduction ignée de graphite. On a constaté là, en démolissant le haut fourneau, sur la paroi la plus échauffée, où se faisait l'écoulement des scories, une imprégnation carburée ayant pris, à la base, la forme de graphite et, plus haut, sans intermédiaire, de carbone amorphe. En même temps, existaient : dans le haut, des croûtes d'oxyde de zinc ; plus bas, du zinc métallique. Ces parties inférieures ont également présenté des cristaux de fer recouverts de graphite et de l'azoture de titane. Le graphite, en veinules formées de fines houppes comme celui de Schwarzbach, était accompagné parfois d'une substance jaunâtre, rappelant la nontronite par son aspect, mais anhydre. Au microscope, on a pu voir la roche entièrement recristallisée, avec des feuillettes de graphite parallèles. Les scories offraient parfois du graphite dans leurs vacuoles extérieures, mais jamais dans leur masse même. L'ensemble de ces faits semble prouver une cristallisation du graphite par apport gazeux. (*Z. f. pr. G.*, 1903, p. 22).

dants, en certains pays, dans les mêmes bancs, et également à l'état de niveaux interstratifiés. Elle se rattache à tout l'ensemble de questions si complexes que soulèvent les terrains dits primitifs. Il faut cependant observer qu'une telle conclusion n'est pas absolument nécessaire. Si l'on suppose, en effet, dans les sédiments métamorphisés, des lits de matières organiques, plus ou moins analogues à des schistes bitumineux ou à des schistes houillers, la cristallisation simultanée des éléments argileux et hydrocarburés du schiste a pu donner aisément des alternances de biotite et de graphite. Le feldspath et le quartz étant, dans cette hypothèse, un apport secondaire du métamorphisme, on s'explique comment ils ont pu englober du graphite comme du mica. Enfin l'aspect d'une brèche peut, à la rigueur, être dû à quelque remise en mouvement, opérée, par exemple, sur des hydrocarbures bitumineux avant leur transformation en graphite, à un ensemble analogue à celui que l'on observe dans les carrières d'asphalte ou dans les bancs pétrolifères fissurés, surpris ici et fixé par le métamorphisme.

Une autre particularité intéressante, puisqu'elle constitue, elle aussi, un fait très fréquent, en dehors même de la région que nous considérons actuellement, est l'association ordinaire du titane avec le graphite. Nous avons signalé plus haut la présence d'une syénite augitique avec sphène, passuite et grap¹. Le même sphène se retrouve, avec de la chondrodite et du graphite, dans les cipolins. Mais surtout le rutile est un élément très constant des gneiss graphiteux ; il paraît, en Bavière, intimement associé avec le graphite, se développant dans les gneiss à cordiérite uniquement lorsque celui-ci s'y montre aussi.

On a retrouvé un fait identique au Canada, où le graphite de Buckingham et de Lœchhaber, encaissé de même dans des gneiss au voisinage de cipolins, est également accompagné de rutile et souvent aussi de sphène, développé dans les calcaires ; au mont Botougol, nous venons de rencontrer la même relation du graphite et du sphène et, un peu partout, les schistes métamorphiques graphiteux sont riches en rutile. L'idée de chercher une origine profonde à cette association est donc toute naturelle. On doit pourtant remarquer à ce propos encore que les inclusions de rutile sont fréquentes dans la plupart des schistes métamorphiques, graphiteux ou non, et se retrouvent souvent dans les micas d'une foule de terrains, où il est peut-être permis de voir des éléments argileux résorbés. Pour la même raison, le sphène microscopique est abondant dans les schistes amphiboliques, où l'amphibole décèle la présence antérieure de calcaire magnésien. L'acide titanique est, évidemment, dans les sédiments, un élément beaucoup plus fréquent qu'on ne le croit en général, et il a pu, en outre, être introduit par le métamorphisme¹.

Enfin un dernier fait, auquel les partisans de la théorie interne ont attribué une importance injustifiée est la présence fréquente d'amas kaoliniques au contact de lits graphiteux, à Schwarzbach comme en

¹ J'ai signalé autrefois [*In DE GROSSOUVRE. Minerais de fer du centre de la France* (Ann. des Mines, 1836, p. 104)] la présence du rutile dans les argiles dites sidérolitiques du Berry. Il existe de même du rutile dans le gisement salin de Stassfurt. Le granite moyen de la Creuse renferme 0,32 p.100 d'acide titanique. C'est un point dont il sera question quand nous étudierons ce corps.

Bohème, ou d'une zone altérée et kaolinique le long du graphite, au milieu des roches généralement très fraîches de Ceylan. En dehors du kaolin, il paraît que les roches encaissantes du graphite présentent, pour la plupart, mais non constamment, en Bavière et Bohème, une altération remarquable. Quand on attribuait au kaolin une origine profonde et hydrofluorée, on pouvait voir, dans ce rapprochement, un indice que le graphite serait provenu d'une émanation connexe, également profonde, et c'est la théorie de E. Weinschenk, qui, tout en remarquant l'arrêt en profondeur de certains kaolins et l'interruption de leur exploitation, admet cependant que d'autres se prolongent indéfiniment. Mais l'observation de nombreux gisements de kaolin dans le Plateau Central ne me paraît guère laisser de doute sur le caractère purement superficiel du phénomène de kaolinisation, qui peut tout au plus avoir été préparé et facilité par une ancienne réaction chimique exercée sur les feldspaths : réaction qui les aurait mis dans un état particulièrement instable. La présence de kaolin au contact du graphite prouve donc seulement qu'il a existé là des lits de pegmatite ou de granulite, comme dans le Limousin, et tout au plus aurait-on pu, si le rapprochement du kaolin et du graphite était plus constant qu'il ne l'est en réalité, supposer une émanation hydrocarburée de ces pegmatites ultérieurement kaolinisées, comme on en observe directement en Norvège et comme nous venons d'en voir un exemple probable à Ceylan. L'altération spéciale des couches à graphite, qui souffre d'ailleurs de nombreuses exceptions, n'a peut-être pas d'autre cause que la facile pénétration des eaux superficielles au contact de ces lits charbonneux particulièrement imperméables et c'est apparemment la raison, pour laquelle, dans les gisements alpestres, dont il sera question plus loin, la pegmatite étant remplacée par du chloritoschiste au contact des graphites, il s'est produit, par une altération analogue, du talc au lieu de kaolin.

Cette transformation du feldspath en kaolin a donné, comme la théorie peut le faire prévoir, un résidu siliceux sous la forme d'opale ; et la décomposition connexe de certains minéraux pyroxénés, débutant par leur ouralisation, paraît avoir produit un silicate de fer hydraté, la nontronite (que l'on retrouve, dans les mêmes conditions, à Ceylan), comme le feldspath donnait un silicate d'alumine, en même temps qu'un peu de manganèse laissait un silicate de manganèse appelé mog¹.

Par contre, nous avons noté, en passant, les relations fréquentes du graphite avec des calcaires fétides, c'est-à-dire hydrocarburés : relation qui existe, non seulement à Passau et à Schwarzbach, mais aussi à Swojarow

¹ La question discutée de la kaolinisation sera étudiée plus loin. Si le phénomène doit être considéré comme superficiel et récent, ainsi que nous le croyons, on ne peut admettre l'idée de E. Weinschenk, qui voit, dans l'état d'oxydation des éléments altérés, la preuve que le graphite ne s'est pas formé en milieu réducteur, et s'attache surtout à expliquer cette oxydation, qui lui paraît un caractère essentiel des gisements graphiteux et, suivant lui, exclut absolument l'idée d'une origine hydrocarburée. Dans toute hypothèse, nous avons déjà dit que le graphite paraît provenir de carbures d'hydrogène ou peut-être de cyanures. Même l'acétylène, produite par la vapeur d'eau agissant sur les carbures alcalino-terreux, donne industriellement du graphite. Celui-ci est obtenu encore bien plus facilement par les combinaisons cyanurées.

Bohême, à Kunstadt en Moravie, au Canada, en Suède¹, et même, ce qui est plus singulier, au mont Botougol, etc.

Le rapprochement de ces cipolins fétides avec des schistes graphiteux pourrait être analogue à celui des divers terrains (calcaires, silex et schistes), tous chargés de produits bitumineux dans le permien du Plateau Central; ce serait là l'indice que les hydrocarbures existaient, pour une cause quelconque, dans le bassin sédimentaire, où se sont déposés calcaires et argiles.

On rencontre, d'ailleurs, assez fréquemment des cristaux de graphite foisonnant dans les divers cipolins de France : à Savennes, dans le Plateau central ; à Ville-ès-Martin, dans la Loire-Inférieure ; à Sainte-Marie-aux-Mines (Vosges²). Ce ne sont peut-être que les transformations métamorphiques de la matière qui noircit tant de bancs calcaires : métamorphisme, dont on a parfois la preuve directe au contact des granites les traversant (Ariège, etc.).

On peut ajouter que, partout, le graphite des zones cristallophyl-liennes fait partie d'un même groupement complexe comprenant des terrains très variés, à types à la fois très acides et très basiques, depuis les leptynites et aplites jusqu'aux amphibolites, pyroxénites et cipolins. Tout cet ensemble, si difficilement explicable dans l'idée d'une formation éruptive ou d'une première croûte de consolidation, a bien des chances pour être le résultat d'un métamorphisme sur des sédiments variés, tels que des calcaires, schistes et grès, dont quelques-uns auraient contenu des hydrocarbures. On a vu que, même à Ceylan, c'est dans des terrains de ce genre qu'on a trouvé le graphite.

Quoi qu'il en soit, l'existence du graphite dans les gneiss de Bavière et de Bohême est certainement très ancienne ; car toutes les roches intrusives, notamment les gabbros et les porphyrites, traversent les lits de graphite, et la pyrite même, très abondante dans certaines parties des gisements, où on l'a supposée émanée de certaines de ces roches à plagioclase, les recoupe³.

¹ Si l'on suppose que les leptynites et d'anciens calcaires, leur relation fréquente avec les graphites rentrerait dans le même ordre de faits. J'ai également signalé autrefois (*Gites métallifères*, I, 712) et nous retrouverons plus tard une association intéressante de graphite avec des minerais de fer. Il s'agit de la région de Norberg, où des lentilles d'oligiste et de magnétite sont intercalées dans des zones de leptynites, alternant avec des micaschistes, à l'Ouest d'un massif de granite. Dans une de ces zones, où apparaissent des cipolins dolomitiques (Klackberg et Kolningsberg), des minerais de fer, associés avec ces cipolins, sont presque exclusivement composés de magnétite avec 10 p. 100 de manganèse et 2 p. 100 de graphite, qui se concentre souvent en veines minces. Un peu plus loin, on trouve, sur la même traînée, à Halfvarshenning, de véritables poches de graphite dans le gneiss. Peut-être cette association de graphite et d'oligiste doit-elle être (au métamorphisme près) rapprochée des *kohleneisenstein*, *blackband* et carbonates de fer carbononneux du carbonifère, qui, d'autre part, sont, on le sait, en général, très fortement phosphoreux. La même région suédoise de Norberg présente des filons de quartz chargés de bitume, où l'on serait tenté de voir, dans la théorie inorganique, l'origine des produits carburés transformés un peu plus loin en graphite.

² LACROIX. *Minéral. de la France*, t. 2, p. 359.

³ Woldrich a étudié, à Schwarzbach, de petites concrétions rondes, où il avait vu des restes organiques, et qui, d'après Weinschenk, seraient des boules de pyrite

On a attaché quelque importance à la présence de cette pyrite pour prouver l'origine profonde du graphite ; le fait qu'elle lui est postérieure paraît enlever sa valeur à l'argument.

Graphites des États-Unis (Ticonderoga) et du Canada (Buckingham) ¹. — On peut rapprocher des graphites bavares divers autres gisements de graphite dans les gneiss.

A *Ticonderoga (New-York)*, il existe un gisement, exploité depuis quelques années pour la fabrication des creusets et connu depuis 1883.

On le rencontre sous forme de bancs interstratifiés au milieu du gneiss dans une montagne nommée Blacklead Mountain (montagne de plombagine). Le plongement est d'environ 45°. Les veines ont de 2 à 20 cm. de large et forment, en certains points, avec le gneiss, des alternances répétées ; elles se présentent avec des élargissements en poche et des rétrécissements fréquents. L'une d'elles a pu être suivie jusqu'à 100 m. de profondeur.

Le minerai, généralement écaillé, est d'assez bonne qualité quand on l'a séparé de sa gangue ; on le prépare, comme celui de Bohême, par pulvérisation au pilon et lavage au bac à piston.

Au *Canada*, les principaux points où l'on connaît du graphite sont *Buckingham* et *Lochaber*, aux environs de la ville de Greenwall, comté de Buckingham².

Le graphite y est, comme en Bohême, associé à des calcaires cristallins formant des lentilles au milieu des gneiss. Au voisinage des calcaires, le gneiss est imprégné de graphite, disposé tantôt en paillettes aplaties comme des micas, tantôt en amas plus ou moins grands.

Quelques minéraux ont été signalés comme accompagnant le graphite : la calcite, le quartz, le pyroxène, le mica, l'apatite, le sphène. Les cristaux de calcite, quand on les fend, montrent des écailles de graphite suivant les clivages.

On a attaché une importance particulière au sphène (silicotitanate de chaux), qui peut être considéré comme résultant de l'action de l'acide titanique sur le calcaire. Cette liaison de l'acide titanique avec le graphite se présente en effet, nous venons de le dire, comme un phénomène assez fréquent³.

altérées, à zones concentriques de graphite (?). N'y a-t-il pas lieu de les rapprocher des concrétions étudiées par Vernadski dans les monts Ilmen ? Ou ne faut-il pas, au contraire, rapprocher ce phénomène des nodules graphiteux à phosphate de chaux et à pyrite, que l'on a exploités dans le silurien du pays de Galles et dans le dévonien des Pyrénées (las Cabesses, etc...) ? Cette dernière hypothèse serait évidemment en faveur d'une origine organique.

¹ 1877. VENNOR. *On the iron ores, apatite and plumbago deposits of Ottawa county* (Geol. survey of Canada, p. 244). — 1877. OBALSKI. *Rapport sur les mines du Canada*. — 1886 et 1887. *Min. Res. of the United States* (1886, p. 686, et 1887, p. 351 et 672). — 1910. BASTIN *Orig. of cert. Adirondack dep.* (Econ. geol. mars. 25 p.) — 1910. *Rapport des opér. min. de la prov. de Québec*, p. 63.

² En 1910, le district de Buckingham a produit 136 t.

³ Ce graphite est cristallin et il vaut environ 530 fr. la tonne. On en a extrait 136 t. en 1910.

IV. **Graphite de Styrie et des Alpes.** — Si l'origine des gisements précédemment étudiés de Bohême et Bavière est, en résumé, discutable, il en est autrement de certains gisements alpestres, dans lesquels l'on doit voir, sans aucun doute, des combustibles métamorphisés.

Il existe, dans les Alpes, une zone graphiteuse, que l'on exploite avec une certaine activité en Styrie, dans les Tauern de Rottenmann, et dont l'équivalent paraît se retrouver dans les Alpes liguriennes (vallée de la Bormida près Bagnasco), ou encore dans la vallée de Waldens, près Pinerolo, non loin de Turin¹.

Dans cette région de *Rottenmann*, le graphite forme des lits intercalés au milieu d'une série de schistes micacés, chloritoschistes, phyllites, etc.,

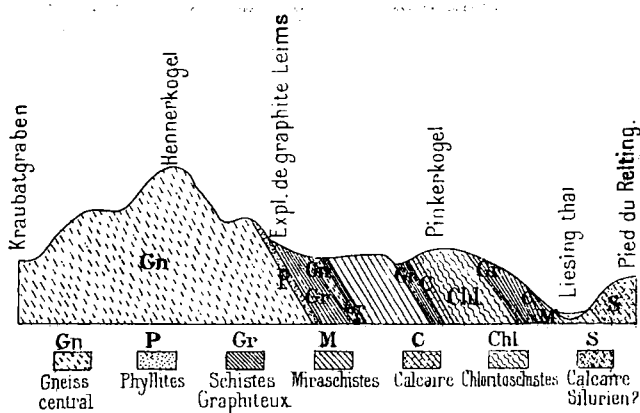


Fig. 45. — Coupe à travers le Leimser Graben, d'après E.-V. Miller et Weinschenk.

qui, d'après des plantes découvertes en recherchant le graphite à Pressnitzgraben près Kaisersberg, ou près de Kammern, à Leims, seraient le représentant alpin du carbonifère supérieur. Nous retrouvons donc le graphite dans un groupe de terrains métamorphiques, qui ont dû contenir ici de la houille, transformée en graphite par l'action calorifique connexe des plissements² et peut-être aussi par des intrusions éruptives granitiques. Ainsi que le montrent deux profils ci-joints (fig. 45 et 46), les chloritoschistes à graphite sont recouverts par un calcaire d'âge hypo-

¹ La bibliographie comprend, outre l'ouvrage de Weinschenk déjà cité : 1871. PAUL. *Graphit vom Paltenthal bei Rottenmann, Steyermark* (Verh. geol. Reichs., p. 169). — 1883. STUR. *Funde von untercarbonischen Pflanzen der Schatzlarer Schichten am Nordrande der Central Kette in den nordöstlichen Alpen* (J. geol. Reichs., t. 33, 189). — 1892. C. v. JOHN. *Ueber steyerische Graphite* (Verh. Geol. Reichs., p. 413). — 1894. J.-W. GREGORY. *The Waldensian gneisses* (Quart. Journ., t. 50, p. 232). — 1895. S. FRANCHI et NOVARESE. *Appunti geologici e petrografici sui dintorni di Pinerolo* (Boll. Com. geol. Ital., t. 26, p. 385 et 422). — 1898. NOVARESE. *Giac. di grafite delle Alpe Cozie* (Roma. Uff. geol., 45 p. et Ras. min., t. 9, 15 p.). — 1900. HÖRNES. *Der Metam. der Obersteirischen Graphitlager* (Mitth. d. Naturw. V. f. Steyermark, p. 90 à 131). — REDLICH., même titre (Oest. Z. f. B. u. H., p. 403-404). — 1900. WEINSCHENK. *Das Talcvorkommen bei Mautern in Steyermark* (Z. f. pr. G., p. 41).

² E. WEINSCHENK défend très vivement l'idée du métamorphisme de contact contre Hörnes, pour lequel il n'y a que dynamométamorphisme.

thétique¹ probablement antérieur au leur, c'est-à-dire renversé au-dessus d'eux. Le graphite présente parfois une telle analogie avec de l'antracite et en a si bien conservé la structure charbonneuse (en ayant pris toutefois une dureté extrême) qu'on peut le confondre avec ce combustible. Mais l'analyse et l'emploi industriel ne laissent pas de doute sur sa véritable nature : c'est bien du graphite, et même généralement du graphite plus pur qu'en Bohême, ne renfermant pas de pyrite. On trouve, dans le gisement, des sortes de cokes bulleux, aux cavités

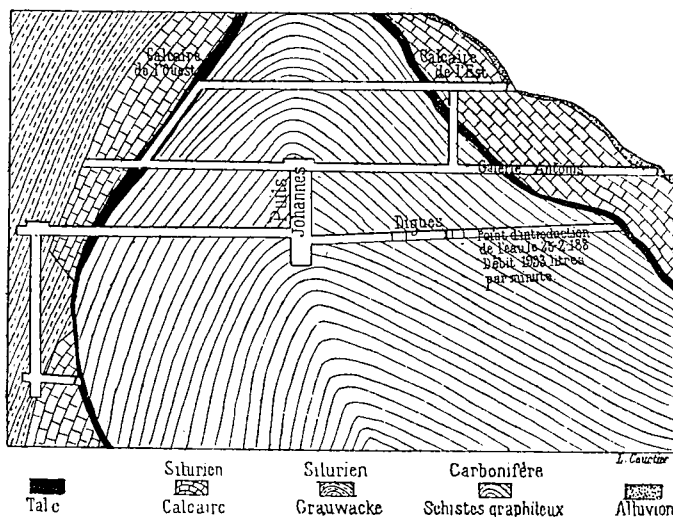


Fig. 46. — Coupe transversale des mines de talc de Mautern, d'après Rassauer-Scropeck et Weinschenk.

remplies d'une poussière de graphite, qui accusent nettement l'action de la chaleur.

Ces gisements ne présentent pas de formations kaolineuses, comme ceux de Bavière ; mais l'altération des chloritoschistes encaissants y a donné (à Mautern) des veines de talc exploitables, dont on retrouve l'équivalent à l'autre extrémité des Alpes, près de Pinerolo.

Comme l'indique une coupe ci-jointe (fig. 46), le talc se trouve sur les deux flancs d'un anticlinal, à peu près au contact des chloritoschistes à graphite, caractérisés par des grains jaunes de rutile et d'un calcaire pré-carbonifère, recouvert par des grauwackes. Il forme des sortes de lentilles, dues à une altération sur place, et dans lesquelles se poursuit la schistosité des chloritoschistes encaissants : lentilles, qui, d'abord grises à la périphérie, vont en se décolorant vers le centre, mais peuvent rester blanches sur 3 m. d'épaisseur. Contrairement à l'opinion de E. Weinschenk, qui voit là un apport profond de sources thermales

¹ E. WEINSCHENK, qui l'avait d'abord considéré comme silurien, paraît avoir abandonné cette hypothèse.

magnésiennes, je crois cette formation du talc reliée aux phénomènes de cémentation superficielle que nous étudierons au chapitre de la magnésie¹.

Les phénomènes sont, d'une façon générale, les mêmes à *Pinerolo*, près Turin, bien que les bancs graphiteux s'y intercalent dans des roches métamorphiques d'un type différent, ressemblant à des gneiss ocellés ou à des quartzites, et on les observe également semblables en Ligurie, où le graphite accompagne de l'antracite. Le gisement de Rifreddo, à l'Est de Savone, dans l'Apennin ligurique, montre le passage du graphite à un antracite, qui aurait une certaine valeur, malgré ses 15 p. 100 de cendres, s'il n'était chargé de gaz, qui se dégagent à l'abatage et le réduisent en poussière.

Un autre gisement de graphite, situé dans les Hautes-Alpes, à la montagne du *Chardonnet*, a été étudié autrefois par Elie de Beaumont et Lory². Là, la transformation de l'antracite en graphite s'est nettement produite au contact d'un filon intrusif de porphyrite ; le graphite est taché de rouille.

L'origine organique de tous ces gisements alpins n'est donc en aucune façon contestable. Aussi, E. Weinschenk, qui les décrit (à l'exception de celui du Chardonnet), s'est attaché à signaler les différences entre eux et les gites de Bohême, auxquels il attribue, comme on l'a vu, un mode de formation très différent.

Ses principaux arguments sont : 1° que les gneiss encaissants de Bohême ne sont pas graphiteux, tandis qu'il existe une sorte de passage progressif en Styrie et dans les Alpes ; 2° que le graphite moule les minéraux de Bohême, ou s'introduit dans leurs fissures, tandis qu'il est en fine poussière en Styrie ; 3° que les minéraux du métamorphisme en Styrie, postérieurs à la formation du graphite, en englobent des parcelles.

Mais, il faut bien le dire, les rapprochements de tous genres sont également nombreux : même allure en lentilles interstratifiées, même contact avec des bancs calcaires, même abondance de titane (fer titané, sphène et rutile en Styrie)³. Notre conclusion est donc qu'on ne saurait actuellement se prononcer d'une façon absolue sur les gisements cristallophyl-liens de Bavière, tout en admettant qu'il existe des arguments sérieux en faveur de leur origine intrusive ; mais il ne semble pas moins incontestable qu'aux deux extrémités de la série on a : d'une part, des graphites

¹ Tome 2, p. 219 — Le graphite lui-même perd son éclat et sa valeur aux affleurements des couches, bien qu'il résiste à l'altération complète dans la zone d'oxydation directe, comme nous avons eu l'occasion de le voir à Ceylan ; mais il peut quelquefois disparaître dans la zone de cémentation plus profonde, en laissant un résidu argileux.

² 1828. Ann. Sc. nat., t. 15, et 1864, *Descrip. géol. du Dauphiné*, t. 3, 531. — Lacroix. *Min. de la France*, t. 2, 36.

³ E. WEINSCHENK, remarque seulement, à ce propos, qu'en Bohême les roches non graphiteuses sont, en général, pauvres en rutile, tandis qu'en Styrie le titane est abondant un peu partout. Il insiste, d'autre part, sur l'altération du kaolin, qui, pour les raisons déjà indiquées, ne nous paraît pas à faire intervenir. De toutes façons, on remarque, dans les Alpes, une altération analogue le long du graphite, mais ayant porté ici sur des schistes chloriteux, et non plus sur des pegmatites, en sorte qu'il s'est produit du talc au lieu de kaolin.

d'origine interne, cristallisés dans des bains de fonte, ou, par fumerolles, dans des roches acides et dans des quartz, et, d'autre part, des graphites organisés obtenus par une simple cuisson profonde de combustibles ; c'est-à-dire que, suivant les cas, ce carbone a ou n'a pas passé par les phénomènes de la vie.

Gisement de Rhode Island. — A titre de comparaison, nous signalerons, à *Rhode Island*, dans la Nouvelle-Angleterre, des couches de houille ayant pris localement par métamorphisme une texture graphitique, en perdant leur matière volatile. Ce graphite spécial a été exploité à Cumberland Hill (600 t.) et Cranston (3 000 t. d'un corps intermédiaire entre l'antracite et le graphite) pour des usages métallurgiques (procédé Eames).

B. — DIAMANT ¹

Nature du diamant. — On sait que le diamant est du carbone cristallisé. La première observation précise sur la nature du diamant est due à Lavoisier, qui reconnut en lui un corps combustible « analogue au charbon ». L'analyse précise fut faite par Dumas en 1840.

Les diamants ne sont jamais purs. Les plus transparents tiennent au moins 0,1 à 0,2 p. 100 de cendres, dans lesquelles il entre du silicium, du fer et du calcium. L'état réel de ces éléments dans le diamant est inconnu ; on ne sait s'il n'y a pas solution solide, au lieu de la simple interposition mécanique supposée autrefois. D'après certaines expériences récentes sur le rôle joué par des traces d'éléments étrangers dans diverses cristallisations, on est conduit à se demander si tel ou tel de ces éléments, le silicium en particulier, ne jouerait pas, dans la cristallisation du diamant, un rôle actif, dont on n'a pas assez tenu compte dans les essais de reproduction artificielle.

Propriétés du diamant. — Le diamant existe sous trois états : diamant proprement dit, boort et carbonado ou diamant noir. Nous ne parlerons d'abord que du diamant proprement dit.

¹ Voir, d'une façon générale, pour tout ce qui concerne le diamant : 1897. L. DE LAUNAY. *Les diamants du Cap*, 1 vol. in-8° de 240 p. Baudry, On peut consulter, en outre, comme ouvrages généraux :

1808. BRARD. *Traité des pierres précieuses*. — 1832. GOEBEL. *Ueber Entstehung der Diamanten* (Karstens. Arch. Chem., t. 35 et 28). — 1835. BREWSTER. *Observ. rel. to the structure and origin of the diamond* (Geol. Soc. Trans., t. 3, et Philos. Mag., t. 7). — 1855. BABINET. *Du diamant et des pierres précieuses* (R. des Deux M., 15 fév.). — 1860. MASKELYNE. *On diamonds*. — 1861. POLE (W.). *Diamonds*. — 1863. GOEPPERT. *Die Diamanten und ihre Entstehung* (Schles. Gesells. Jahresb.). — 1864. GOEPPERT. *On the vegetable origin of diamonds* (N. J. Min. — Q. J. G. Soc. Lond., 1865). — 1873. H. VON BAUMHAUER. *Sur le diamant* (Arch. néerl. Sc. ex. et nat., t. 8, p. 97. La Haye.) — 1876. MALLARD. *Explic. des phénomènes optiques anormaux* (Ann. des Mines, 7^e série, t. 10). — 1874. DIEULAFAIT. *Diamant et pierres précieuses* (Bibl. des Merv., Hachette). — 1878. M. MARTIN. *Notizen ueber Diamanten* (Z. d. D. geol. Ges., t. 30, p. 321, Berlin). — 1881. JANNETAZ. *Diamant et pierres précieuses* (1 vol. Rothschild). — 1884. JACOBS et CHATHIAN. *Le diamant* (1 vol., Masson). — 1886. BOUTAN. *Le diamant* (1 vol., Dunod). — 1909. BAUER. *Edelsteinkunde* (Leipzig).

Celui-ci se présente en *cristaux* très petits. Ceux de 5 carats ou d'un gramme¹ sont déjà assez rares. Les cristaux sont presque toujours à faces et à arêtes courbes et présentent sur leurs faces, des stries et des impressions régulières. Cette courbure est un fait, sur l'origine duquel on a beaucoup discuté et qui se présente d'ailleurs dans un grand nombre d'autres minéraux (gypse, tourmaline, calcite, etc...), mais à un degré moindre et seulement dans un sens unique, tandis que la courbure du diamant existe dans tous les sens, au point de produire parfois une apparence sphérique. Le phénomène est superficiel, puisque les faces de clivage sont planes, et ne tient pas à l'usure, puisque les faces extérieures conservent néanmoins des traces d'impressions très fines. On a essayé de l'expliquer d'une manière un peu insuffisante par des dépôts de couches successives en retrait les unes sur les autres autour d'un noyau central (Schalenbildung des Allemands), ou par un grand nombre de petites facettes trop nombreuses et trop peu inclinées pour qu'on puisse les distinguer.

Les formes cristallines du diamant semblent dériver du cube. Mallard a cependant montré qu'il ne fallait voir là qu'une forme limite plus symétrique, vers laquelle tend le groupement des molécules probablement rhomboédriques, comme cela se produit également pour l'amphigène, la boracite, l'analcime, la fluorine, l'alun, plusieurs grenats, etc...

Cette remarque faite, si nous nous en tenons aux apparences, les formes principales du diamant sont l'octaèdre (très fréquent au Cap), le dodécaèdre et l'hexoctaèdre octaédrique qu'on trouve surtout au Brésil; ou l'octaèdre modifié par le dodécaèdre a^1b^1 , par le tétrahexaèdre a^1b^m , etc... En outre, il existe des formes hémihédriques : en particulier, le tétraèdre ou certains cristaux dits à deux pointes, où l'un des axes ternaires prend une importance prépondérante, ou encore des formes maclées. Dans ce dernier cas, quand on taillait les diamants en rose, on se servait pour obtenir la base de la rose du plan d'hémitropie, suivant lequel on commençait par fendre le cristal. Un clivage très net, parallèle aux faces de l'octaèdre, est toujours utilisé pour la taille.

La *couleur* des beaux diamants est d'un blanc qui prend parfois des reflets bleutés comme l'acier. Lorsque les diamants ont une teinte pâle jaunâtre (comme c'est le cas fréquent au Cap) ou grise, ils perdent beaucoup de leur valeur. Au contraire, certains ont une coloration très vive et acquièrent alors un grand prix comme pierres de fantaisie (fancies); ainsi le diamant bleu de Hope, le diamant rouge rubis de Paul I^{er}, le diamant vert de Dresde. Les diamants d'un jaune franc, d'un vert olive, etc., sont également recherchés.

Pour décolorer les diamants jaunâtres, on a essayé sans succès de tous les moyens, la chaleur, une combustion rapide de la surface avec du nitre, etc.². On réussit, au contraire, à communiquer certaines

¹ Le carat métrique (ou karat), adopté en 1909 par le Bureau International des Poids et Mesures, est de 200 milligrammes. Auparavant, le carat valait 205 milligrammes en France, 192 au Brésil. En abrégé on le note k.

² Un procès a montré, il y a quelques années, qu'on pouvait y arriver — au moins en apparence — en trempant le diamant jaune dans une solution violette d'aniline. La superposition des deux teintes complémentaires produit le blanc; seulement, dès

teintes par des applications de rayons X, mais sans qu'il puisse en résulter d'application pratique.

Inclusions. — Le diamant contient fréquemment des inclusions qu'on reconnaît en l'examinant en plaques minces au microscope (crapauds des joailliers). Celles qui ont été le mieux étudiées sont les inclusions solides, qui sont parfois de véritables cristaux de diamant enfermés dans un cristal plus grand, ou encore du graphite, d'autres fois du quartz, de la topaze, du rutile, de la pyrite, du sulfate de fer, ou même des lamelles d'or¹, etc.. Souvent aussi des taches noires, qu'on prend à première vue pour des inclusions, ne sont que des creux, remplis de gaz peut-être, mais où on n'a jamais constaté la présence d'un liquide.

La *dureté* du diamant dépasse celle de tous les minéraux connus et c'est là la base de tous ses emplois industriels en dehors de la joaillerie. Il ne peut être rayé et poli que par lui-même, sous la forme de poudre ou égrissée. Sous l'action de la lumière, il est remarquable par son *indice de réfraction* supérieur, sinon à celui de tous les corps connus (car la blende, le cinabre et plusieurs autres le dépassent), au moins à celui de tous les corps transparents connus. Il en résulte qu'il présente à un degré supérieur le phénomène de la réflexion totale. Son *coefficient de dispersion* est également considérable et c'est cette particularité qui produit les *feux*, dont on multiplie le scintillement en montant le diamant sur des tiges flexibles. Quelques autres propriétés optiques contribuent enfin à lui donner sa beauté toute particulière. Ainsi le diamant, par suite des réflexions totales, s'imbibe de la lumière qu'il reçoit; placé ensuite dans une chambre noire, il continue à l'éclairer faiblement. La proportion de rayons lumineux, qui est de 56 p. 100 pour le verre, atteint 84 p. 100 pour le diamant. Certains diamants sont même phosphorescents ou fluorescents.

Transparence aux rayons X. — Toutes les variétés de carbone présentent une transparence absolue aux rayons X. Cette propriété, qui a pu être utilisée pour photographier la disposition des cendres schisteuses dans la houille, permet également de reconnaître aussitôt un diamant faux d'un vrai: le premier donnant une tache noire sur l'épreuve.

Electriquement, le diamant est complètement isolant, tandis que le carbone amorphe en agglomérés sert comme conducteur (applications dans les microphones et la téléphonie) et que le graphite, plus conducteur encore, est employé à ce titre en galvanoplastie pour enduire les moules de plâtre ou de guttapercha à recouvrir de cuivre.

Propriétés chimiques. — Le diamant s'évapore en brûlant dans un creuset à l'air libre. On peut également le dissoudre rapidement dans l'azotate de potassium fondu, ou dans un mélange de chlorate de potas-

qu'on lave le diamant à l'eau, il reprend sa teinte naturelle. Il y a cependant certains diamants du Cap, auxquels la présence d'un peu de sulfate de fer communique une teinte verdâtre, qui redeviennent blancs lorsqu'on les chauffe à 300°.

¹ Ce fait s'observe principalement dans les diamants noirs de Bahia (DESCLOISEAUX). MOISSAN l'a reproduit par cristallisation de carbone dissous dans de l'argent légèrement aurifère (Ann. Phys. et Chim., août 1896, p. 549). Les inclusions de topaze, rutile, quartz et pyrite semblent plutôt en rapport avec la cristallisation acide (type Brésil) qu'avec la cristallisation basique ordinairement admise.

sium et d'acide sulfurique. Il y a formation d'un carbonate dans le premier cas, d'acide carbonique dans le second.

Boort. — Le boort, ou diamant concrétionné, noué, est un peu au diamant ordinaire ce que la calcédoine est au cristal de roche. Il est translucide et non transparent. Il ne présente pas de clivages et ne peut être utilisé en bijouterie ; mais, comme sa dureté est supérieure à celle du diamant, on l'emploie en poudre fine avec de l'huile pour la taille. On en rencontre, dans tous les gisements de diamants, une proportion de 2 à 10 p. 100.

Diamant noir. — Le diamant noir, carbon ou carbonado, a été découvert pour la première fois au Brésil en 1843 ; c'est encore de là que presque tous les échantillons proviennent, car il en existe peu au Cap et aux Indes. Il se présente en petites boules à structure fibreuse variant depuis la grosseur d'un pois jusqu'à celle d'un œuf, généralement assez irrégulières. On a trouvé, en 1895, à Bahia, un diamant noir de 630 gr. (3073 carats) ; on en connaît un autre de 1700 carats. Sa densité est moindre et sa dureté beaucoup plus grande que celle du diamant ; il contient plus de cendres.

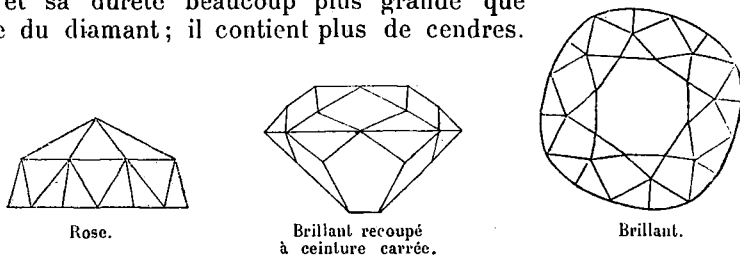


Fig. 47. — Formes successives de la taille des diamants

Usages et taille du diamant. — Le principal usage du diamant est la bijouterie. Avant d'être monté en bijoux, le diamant a besoin d'être taillé.

La taille a été, dit-on, trouvée en 1476, par Louis de Berquen, sous la forme de tables ou de pointes. Vers 1600, on reconnut le clivage octaédrique et l'on commença à dégrossir assez sommairement les pierres, soit en pointes en partant de l'octaèdre, soit en tables : forme habituelle en Orient. Sous Mazarin, on inventa la rose, puis le brillant en 16, enfin le brillant en 32, seule forme aujourd'hui couramment employée pour les diamants réguliers (fig. 47).

Le travail consiste d'abord à *cliver* suivant l'octaèdre. Pour cela, on tient : avec la main gauche, un bâton, au bout duquel le diamant est fixé par du mastic ; avec la droite, un autre diamant tranchant monté de même. On frotte jusqu'à entailler, on introduit un couteau d'acier dans l'entaille et on donne un coup sec avec une bague de fer.

Ensuite vient le *brutage*, exécuté par l'égriseur en frottant deux diamants l'un sur l'autre au-dessus d'une boîte qui reçoit l'égrisée ; puis le *polissage* au moyen d'une roue saupoudrée de poudre de diamant et tournant à 200 tours par minute ; enfin le *sertissage*.

Une particularité longtemps tenue secrète à Amsterdam, c'est le *fil de la*

pierre; on ne peut, en effet, tailler chaque face que dans un sens déterminé.

Le brillant est obtenu en abattant les sommets de l'octaèdre à une hauteur déterminée de manière à réaliser, d'un côté la table, de l'autre la culasse (plus petite) et pratiquant ensuite une série de biseaux; la rose, au contraire, en fendant le diamant suivant un plan d'hémitropie pour avoir la base et taillant des facettes triangulaires.

Cette opération de la taille du diamant revenait, avant la découverte des diamants du Cap, à environ 7 fr. par carat pour les pierres d'un carat et était à peu près monopolisée à Amsterdam. L'arrivée de grandes quantités de pierres commença par faire monter ce prix jusqu'à 20 fr. et il se créa des tailleries à Anvers, à Paris, à Saint-Claude (Jura). Le prix, un moment retombé à 8 fr., est remonté à 15 fr. le carat brut. Il est d'autant plus fort que la pierre est plus petite.

Amsterdam garde toujours une situation tout à fait prépondérante et l'on y trouve 70 tailleries qui ont occupé jusqu'à 9.500 ouvriers (dont 1.200 femmes et 1.000 apprentis), taillant 400.000 carats de diamants bruts par an et distribuant 42 millions de salaires. Ces ouvriers, qui, jusqu'en 1878, étaient exclusivement des israélites se transmettant leur secret de père en fils et travaillant en famille, étaient arrivés alors à gagner, par suite de leur monopole, des salaires considérables: 525 fr. par semaine pour les cliveurs, 210 pour les égriseurs, 630 pour les polisseurs. A ce moment, l'industrie perdit son caractère mystérieux. Après avoir payé fort cher pour apprendre le métier, d'autres ouvriers créèrent une concurrence, qui fit tomber les salaires à 60 ou 80 fr. pour les cliveurs, 35 à 60 pour les égriseurs, etc. En 1907, une crise financière américaine, qui a arrêté les achats de diamants, ordinairement très considérables, des américains du Nord, a fait fermer un moment ces tailleries. En septembre 1909, une statistique donne, comme tailleurs de diamants occupés: 8.491 à Amsterdam, 3.591 à Anvers, 100 à Paris, plus quelques ouvriers dispersés dans le Jura, en Allemagne (Hannan, Lauerbach), en Suisse et en Amérique (New-York).

Prix des diamants. — La valeur des diamants varie beaucoup avec la couleur, la forme, l'éclat de la pierre, etc... Avant l'arrivée des diamants du Cap, elle croissait à peu près proportionnellement au carré du nombre de carats. Depuis, les gros diamants, devenus plus fréquents, ont commencé par diminuer de prix; mais ce prix s'est beaucoup relevé dans ces dernières années, tandis qu'on maintenait plus difficilement les cours pour les petites pierres, dont certains gisements nouveaux produisent de grandes quantités. Nous reviendrons sur cette question en parlant des gisements du Cap.

En 1830, le carat taillé, pour des pierres de dimension moyenne, valait 240 à 280 fr.; il s'est élevé d'abord à 300 fr. vers 1860, puis à 700 et 800 fr. vers 1869. La guerre de 1870, coïncidant avec la découverte des gîtes du Cap, l'a fait baisser subitement à 400 ou 500 fr. le carat. La guerre anglo-boër (octobre 1899 à juin 1902), en amenant l'arrêt des mines de Kimberley pendant plusieurs mois, a déterminé, au contraire, une hausse considérable jusqu'à 800 et 1.000 fr., que la crise américaine de 1908 a seulement arrêtée un moment.

Les chiffres donnés plus loin pour les mines du Cap montreront des mouvements de hausse et de baisse pour le prix moyen par carat brut relatif à toute la production annuelle d'une mine. Mais, comme le fera voir à elle seule la comparaison entre les prix moyens des diverses mines de ce pays, c'est une erreur absolue de considérer des chiffres moyens : rien ne pouvant être plus variable que la valeur d'un carat, suivant la dimension totale et la beauté de la pierre.

Voici, par exemple, des prix de diamants bruts vendus au Cap à un moment où le carat moyen valait 34,35 fr. (1896) :

Cristaux blancs de première qualité : pour 4 carats, 125 fr. le k. ; pour 2 k., 94 ; pour 1, 75. — *Cristaux dits : Cape première eau* : pour 8 carats, 112 fr. le k. ; pour 4 k., 100 ; pour 2 k., 90 ; pour 1 k., 67. — *Cape deuxième eau* (légèrement jaunâtre) : pour 8 carats, 94 francs le carat ; pour 4 k., 80 fr. ; pour 2 k., 78 ; pour 1 k., 62 francs.

Suivant les moments, non seulement le cours du carat moyen peut varier du simple au triple ; mais encore le prix de telle qualité s'élève par rapport à celui des autres. C'est ainsi que, depuis 1905, la production très abondante de pierres inférieures ou petites à la mine Premier a fait baisser fortement ces qualités, tandis que les belles pierres voyaient monter leurs cours.

Si nous passons au prix du diamant taillé, il y a lieu de faire intervenir le déchet, qui peut souvent réduire le poids presque à moitié, puis le prix de la taille, enfin les bénéfices considérables de tous les intermédiaires. Ainsi, en 1910, le prix moyen du carat brut au Cap étant d'environ 70 francs, le carat taillé acheté en lots par les bijoutiers se paye approximativement, sur la place de Paris, pour un lot de diamants purs et blancs : de 650 à 750 fr. le carat pour des pierres de 1 k. ; de 750 à 850 fr. pour des pierres de 2 k. ; de 1.000 à 1.200 pour des pierres de 5 k. ; jusqu'à 1.500 pour de grosses pierres pures, blanches et bien taillées. Si la teinte est moins bonne, on compte une différence en moins, dans chaque prix, de 50 à 80 fr. par carat. Ces chiffres sont naturellement très variables suivant les qualités et applicables à des achats en gros ; ils s'accroissent encore très notablement quand le diamant arrive monté aux mains du public. On peut en retenir que le prix d'un bon diamant taillé de 2 k. représente, par carat, environ dix fois le prix du carat moyen brut au Cap¹.

Certains diamants célèbres ont un prix considérable en raison de leurs dimensions ou de leur beauté. Nous citerons le Régent (Inde), compté 12 millions, qui pesait brut 410 k. et que la taille a réduit à 136 k. ; l'Étoile du Sud (Brésil), vendue par un syndicat 2 millions ; l'Orloff de 193 k. ; le Kohinoor (106 k.) ; le Sancy (53 k.), etc...

L'Afrique du Sud a produit, dans ces dernières années, quelques diamants d'une taille exceptionnelle : ainsi le Reitz de 634 k. ; l'Excelsior de 971 k. trouvé à Jagersfontein en 1893² ; puis le Jubilee (de 239 k., une

¹ A titre d'exemple, un diamant brut de 5 1/4 carats, acheté par un bijoutier à raison de 76 francs le carat pour 413 francs, alors que le prix moyen du carat était de 31 francs, a coûté 76 francs de taille, à raison de 14 francs le carat brut et a donné un diamant taillé de 2 3/4 carats, revenant à 489 francs, qui valait au même moment à Paris 1.000 à 1.200 francs et peut valoir 2.000 fr. en 1914.

² Voir sa reproduction dans *L. De Launay*. Les diamants du Cap, fig. 6, p. 61.

ois taillé), trouvé également à Jagersfontein ; le Cullinan de 3.032 k. qui a été taillé et offert en 1906 au roi Edouard VII (trouvé à la mine Premier¹).

Le marché du diamant brut est surtout à Londres ; puis à Amsterdam, Anvers et Paris.

Usages accessoires². — Indépendamment de la bijouterie, le diamant a quelques autres emplois, que son prix rend assez restreints. On utilise alors généralement les diamants à cristallisation confuse, qui ont l'avantage de ne pas présenter de clivage et de ne pas se briser sous un choc. On s'est servi longtemps de diamants pour graver les pierres dures ; on s'en sert encore pour dresser des pivots d'instruments de précision, pour tourner les bords des verres de montre, pour tréfiler l'or et l'argent, pour travailler certains métaux trempés (chez Krupp, à Essen). Plus récemment, on a utilisé ce minéral pour le sciage mécanique des pierres dures³. La vitrerie emploie des diamants tranchants à arête courbe faisant une rayure extrêmement fine. Les sondages au diamant dans les roches dures consomment une assez grande quantité de carbon, ou diamant noir, à 40 fr. le carat (200 fr. le gr.). Enfin, on a essayé d'en faire des lentilles de grande réfringence pour réduire l'aberration de sphéricité en gardant l'achromatisme ; mais on a été arrêté par des irrégularités de biréfringence.

Centres de production du diamant. — Les centres de production du diamant ont beaucoup varié d'importance relative.

Tous les anciens diamants venaient de l'Inde, qui peut en avoir fourni environ 2.000 kilogrammes, mais qui aujourd'hui en absorbe sans en produire. Vers 1723, la découverte des gisements du Brésil (Diamantina et Bahia) produisit, dans le commerce de la bijouterie, une révolution analogue à celle que l'on a vu se reproduire vers 1870 quand ont été trouvés ceux du Cap. On estime que, de 1723 à aujourd'hui, il est sorti du Brésil 2.500 kilogrammes de diamants représentant 500 millions de francs. La production actuelle dans ce pays est à peine de 350 carats.

Enfin, en 1867, on a trouvé au Cap les premiers diamants d'alluvions et, en 1870, les premiers diamants en place (mines sèches, dry diggings). Il suffira pour donner une idée de la révolution qui en est résultée dans le commerce des diamants, de dire que la production annuelle, estimée

¹ Voir : sur le Jubilee, *la Nature* du 14 juillet 1900 ; sur le Cullinan, *la Nature* du 31 août 1907 et HATCH et CORSTORPHINE (Trans. geol. Soc. of S. Afr. 1905, t. 8, p. 20 à 27 avec pl.). Ce dernier diamant, trouvé le 20 janvier 1905, mesurait brut 10 cm sur 6 1/4 et 3 3/4. Pour le tailler, il a fallu le diviser en deux.

² Voir, pour les emplois industriels de diamant :

1873. BEAUMONT. *Diamond boring machinery*. — 1887. NORDENTROEM. *On anvanduing of diamantborr. Maskiner for malmfyndigheters undersökning* (Forh. geol. för. i Stockholm, t. 9, p. 151). — 1892. FROMHOLT. *Du travail de la pierre par le diamant* (C. R., 6 janvier).

³ D'ESPINE et ACHARD, puis FROMHOLT (C. R., 6 janvier 1892). Suivant BERTHELOT, les Romains auraient connu l'emploi du diamant pour le travail des pierres dures. En 1856, LESCHOT fit un premier essai d'application du diamant au travail des mines. Depuis, le carbon a été également utilisé pour le dressage des meules d'émeri, etc. Puis, en 1885, FROMHOLT tenta de lui substituer le boort, plus difficile à sertir à cause de ses plans de clivage, mais sept à huit fois moins cher, et finit en 1891 par y réussir.

jusqu'en 1870 à 60.000 carats, a, depuis lors atteint deux fois 3.600.000 carats en 1887 et 1898 et n'est maintenue autour de 3.000.000 depuis quelques années que par la nécessité de ne pas surcharger le marché au delà des besoins de la consommation. Actuellement, l'Afrique centrale alimente seule le commerce mondial du diamant et nous ne mentionnerons les autres gisements, Brésil, Inde, Bornéo, etc. qu'à titre géologique.

En 1909, la Société de Beers a produit 1.860.000 k. valant 75 millions de fr¹. Le Transvaal (mine Premier et alluvions) a produit 1.929.492 k., valant 32,4 millions. La colonie d'Orange (Jagersfontein, Koffyfontein et alluvions du Vaal) a donné 656.319 k. valant 25 millions. Le Sud-Ouest africain allemand a produit 400.000 k. Il faut ajouter 5.646 k. pour la Guyane anglaise et 2.205 k. pour le New South Wales.

La production totale des diamants dans le monde depuis l'origine peut être évaluée approximativement comme suit :

	Millions de carats.		Kg.		Millions de francs.
Inde	10	ou	2 050	représentant	426
Brésil (1713-1910)	12	ou	2 500	—	500
Afrique du Sud (1867-1910).	120	ou	24 000	—	3 900
	<hr/>		<hr/>		<hr/>
	142		28 550		4 826

En résumé, l'on peut estimer, les pertes et l'usure des diamants étant insignifiants, qu'il en existe dans le monde environ l'équivalent taillé de 142.000.000 de carats de diamants bruts, ou 28,5 t., ou encore (la densité étant de 3,5) 8 m³ représentant, au cours du brut, 4,8 milliards (600 millions le mètre cube). En tenant compte de la taille, le volume et le poids de ce stock de diamant peuvent être diminués de moitié. Mais sa valeur marchande, aux cours actuels est peut-être cinq à six fois supérieure. On arrive ainsi à des chiffres dont on se fait malaisément une idée et l'on est surpris de penser qu'il puisse encore se placer tous les ans, par une persistance inaccoutumée de la mode, pour 140 millions de francs de diamants bruts, correspondant à plus de 600 millions de diamants taillés, avec un pareil stock qui ne cesse de s'accroître.

DIAMANTS DU CAP (KIMBERLEY ET PREMIER) ²

Nous allons, suivant la méthode généralement adoptée dans ce livre, décrire successivement les gisements de diamants en commençant par

¹ La seule compagnie de Beers a, depuis sa constitution en 1888 jusqu'en 1908, produit 42.800.000 de carats, vendus bruts 1.813.000.000 francs.

² Collection de géologie appliquée à l'Ecole des Mines, nos 1662 et 1714. — J'ai donné, en 1897, un exposé complet économique, industriel et géologique de la question dans l'ouvrage sur les *Diamants du Cap* (Paris, Béranger) et en 1903, un résumé dans les *Richesses minérales de l'Afrique*, p. 193 à 205 (Paris, Béranger). Les données économiques sont à compléter, depuis lors, par les rapports annuels des trois grandes Sociétés de Beers, Jagersfontein et Premier. On peut voir en outre :

1863-65. ADLER. *Diamanten in Sud Afrika* (K. K. geol. R. A., et N. J. Min.). — 1871. GILFILLAN. *On the diamond Districts of the Cap of Good Hope* (Q. J. g. Soc. Lond.). — 1871. STOW. *On the Diamond gravels of the Vaal-River* (London). — 1872-73. J. PATER-

ceux du Cap qui ont aujourd'hui le monopole industriel et nous terminons par des conclusions générales sur le mode de formation du diamant.

Historique. — La découverte des diamants du Cap date de 1867. Cette année-là, un premier diamant fut trouvé sur les bords du Vaal par l'enfant d'un fermier Boer. L'année suivante, les chercheurs commencèrent à affluer aux gisements dits de rivières et l'on découvrit la fameuse *Etoile de l'Afrique du Sud* de 85 k. Alors, à travers le pays désolé qui, des gisements, s'étend jusqu'au Cap sur 1.000 à 1.200 km, accoururent tous les aventuriers de la colonie anglaise au risque de périr de faim et de soif pendant la route. Dès 1869, 10.000 blancs travaillaient aux *diggs*.

En décembre 1870, à la ferme de *Dutoits-Pan*, on trouva la première *mine sèche* (dry digging), c'est-à-dire le diamant en place dans des sortes de cheminées cylindriques verticales formées d'une péridotite, ou kimberlite. A ce moment, ce fut une véritable fièvre, comme lors de la découverte de l'or en Californie; des populations accoururent; une ville sortit du sol. On commença par s'installer de force chez le fermier hollandais propriétaire de *Dutoits-Pan*, qui fut trop heureux de finir par vendre sa

son. *On a visit to the Diamond fields of South Africa* (Proc. geol. Assoc., t. 3, p. 73.). — 1872. SHAW. *On the geology of the Diamond fields* (Q. J. g. Soc. Lond.). — 1873. COHEN. *Diamanten in Sud Afrika* (N. J. Min.). — 1874. DESDEMAINES-HOGON. *Les champs diamantifères du Cap* (C. R., t. 77, et Rev. des Deux M. du 1^{er} juin 1874.). — 1879. DUNN. *On the mode of occur. of diamond in S. A.* (Q. J. g. Soc. Lond.: cf. 1877 et 1881.). — 1874. MASSKELYNE et FLIGHT. *Diam. rock of South Africa* (Q. J. g. Soc. Lond.). — 1877. STANISLAS-MEUNIER. *Sable diamantifère de Dutoitspan* (C. R., p. 250.). — 1878. M^o PATRICKSON. *Voyage aux mines de diamant du sud de l'Afrique* (Tour du Monde). — 1879. FOUQUÉ et MICHEL LÉVY. *Sur les roches accompagnant le diamant dans l'Afrique australe* (B. S. M.). — 1879. FOUQUÉ et MICHEL LÉVY. *Sur la présence du diamant dans une roche ophitique de l'Afrique australe* (C. R., t. 89, p. 1125.). — 1879. CHAPER. *Sur les mines de diamant de l'Afrique australe* (in-8^o, 7 p. Bull. Soc. min., n^o 7.). — 1880. CHAPER. *Note sur la région diam. de l'Afrique australe* (Masson). — 1880. J.-A. ROONDA-SMIT. *Les mines de diamant de l'Afrique australe* (Arch. néerl. sc. ex. et nat., nos 1 et 2 du t. 15, p. 61. Harlcm). — 1881. DUNN. *On the Diamond fields of South Africa* (Quart. J. geol. Soc., t. 37, part. 4, n^o 148, p. 609. Londres). — 1881. COHEN. *Ueber Cap Diamanten* (N. J. Min.). — 1882. COHEN. *Ueber die Sud-Afr. Diamant-feldern* (Funft. Jahresber. des Ver. für Erdkunde in Metz). — 1882. STAN.-MEUNIER. *Roche diamantifère du Cap* (Bull. A. R. Bel.). — 1883. STAN. MEUNIER. *Présence de la pegmatite dans les sables diamantifères du Cap* (C. R., t. 98, p. 380.). — 1883. HUDLESTON. *Notes on the Diamond rock of South Africa* (Proc. geol. As., t. 8, p. 65. Londres). — 1883. WATSON. *Report upon the excavations of the Diamond mines of Kimberley and de Beers* (Cape Town). — 1885. MOULLE. *Sur les mines de diamant de l'Afrique du Sud* (Ann. des Min., 8^o, t. 7.). — 1886. BOUTAN. *Le Diamant* (chez Dunod). — 1886. H. CARVILL LEVIS. *On a diam. Peridotite and the genesis of the diamond* (Rep. 56 th. meet. Br. As. Adv. of Sc., p. 667.). — 1889. BOUTAN. *Sur l'état actuel des mines de diamant du Cap.* — 1889. DAUBRÉE. *Le diamant dans l'Afrique centrale* (Journal des Savants). — 1890. DAUBRÉE. *Analyses de gisement du diamant d'une part dans les gîtes de l'Afrique australe, d'autre part dans les météorites* (C. R., t. 110, p. 18.). — 1890-91. DAUBRÉE. *Sur les explosions de gaz expliquant la formation des cheminées diamantifères* (C. R., t. 114, p. 767, 857; et 112, p. 125 et 1484, cf. B. S. G., 1891). — 1894. A.-W. STELZNER. *Die Diamanten Gruben in Kimberley* (Z. f. pr. Geol., p. 153-157 et Sitzungber. der Isis, Dresde). — 1897. T. G. BONNEY. *The Parentrock of the Diamond in South Africa* (R. Soc. Proc., t. 65, p. 223-236). — 1897. G. GURICH. *Zur Theorie der Diamant Lagerstätten in Sud Afrika* (Z. f. pr. G., p. 145). — 1898. LACROIX. *Sur les minéraux et les roches du gisement diamantifère de Monastery* (Orange) et sur ceux du Griqualand (B. S. Min. t. 21, 1. janv.). — 1898. BECK. *Die Diamantenlagerstätte von Newland in Griqualand West* (Z. f. pr. Geol., p. 163). —

terre 125 000 fr. ; puis on trouva bientôt les trois autres grandes mines *Bullfontein, de Beers et Kimberley*¹.

La mise en exploitation de ces mines passa alors par une série de phases romanesques, qui sont un exemple, socialement curieux à étudier, de la constitution des sociétés régulières succédant à l'anarchie.

Au début, croyant avoir affaire à des alluvions de rivières semblables à tous les autres alluvions diamantifères rencontrées jusque là, on avait, suivant l'habitude des Riverdiggings (explorateurs des minerais de rivière), partagé le terrain en *claims*, ou carrés de 9,45 m. de côté, délimités par des lignes sur le sol et appartenant au premier occupant, qui était forcé de travailler constamment seul et sans aide. Sept absences d'un jour, et il était déchu de son droit.

Bientôt, par suite d'une persistance en profondeur inusitée dans les alluvions, on se heurta à des difficultés inextricables. D'abord, manquant d'eau pour laver, on écrasait le minerai avec des baltoirs ; et, pour se débarrasser des résidus, chacun les jetait chez son voisin. Il fallut imposer aux mineurs l'obligation de transporter ces débris à une certaine distance : distance qui se trouva souvent trop faible, lorsque, les trous s'approfondissant, on dut adoucir la pente des talus.

1898. MOLENGRAAFF. *Diamonds at Rietfontein* (Trans. Geol. Soc. S. A., t. 3, p. 122). — 1899. R. BECK. *Neues von den Afrikanischen Diamanlagerstätten* (Z. f. pr. G., 416 à 419). — 1901. L. DE LAUNAY. *Article Diamant dans le dict. de l'indust. Lamy* (2^e supplém.). — 1902. GARDNER WILLIAMS. *The Diamond mines of South Africa. Some account of their rise and development.* — 1904. H. BUTTGENBACH. *Quelques obs. sur les champs diamantifères de Kimberley* (Ann. Soc. géol. belg. t. 32, 14 p.). — 1904. A. L. HALL. *Ueber einige neue Diamantenlagerstätten Transvaals* (Z. f. pr. G., p. 193). — ROGERS. *Volcanic pipes younger than the Stormberg Volcanoes* (An. Introduction to the Geol. of Cape-Colony). — HATCH AND CORSTORPHINE. *Diamond-bearing deposits. (The Geol. of South Africa)*. — 1905. HAROLD S. HARGER. *The Diamond pipes and Fissures of South Africa* (Tr. geol. Soc. S. A. t. 8, p. 110 à 135). — 1905. H. MOISSAN. *Traité de Chimie minérale* (Article Diamant, t. 2, p. 188 à 218). — 1906. J. P. JOHNSON. *The Geology of the Neighbourhood of the Roberts Victor Diamond mine* (Tr. Geol. Soc. S. A. t. 9, p. 117 à 125). — 1906. R. SCHEIBE. *Der Blue Ground des deutschen Sudwest Africa in Vergleich mit dem des englischen Sudafrica* (Progr. der Kgl. Ber. Ak. zu Berlin für 1906-1907). — 1906. DU TOIT. *The diamondiferous and allied pipes and fissures* (11th An. rep. Geolog. Com. of the Cape of Good Hope). — 1907. A. MACCO. *Ueber die südafrikanischen Diamantenlagerstätten* (Monats Ber. D. Geol. Ges., t. 59, p. 76). — 1907. R. BECK. *Unters. ueber einige Sudafrica. Diamantenlager stätten* (Monats Ber. D. geol. Ges., t. 59, p. 275 307, 4 pl.). — 1907. F. W. VOIT. *Kimberlite Dykes and pipes. The origin of Diamonds, etc.* Observations de T. G. BONNEY, HANS, MERENSKY, J. P. JOHNSON (Tr. Geol. Soc. S. A., t. 10, p. 69 à 112). — 1907. CORSTORPHINE. *The occurrence in Kimberlite of Garnet-pyroxene Nodules carrying Diamonds* (Tr. Geol. Soc. S. A., t. 10, 65). — 1907. L. DE LAUNAY. *Sur la rencontre du granite dans la cheminée diamantifère de Beers* (C. R., 9 déc. 1907). — 1908. F. W. VOIT. *Ueber die Südafrikanischen Diamantenlagerstätten* (Monatsber. D. geol. Gesel., t. 60, n^o 5). — 1908. F. P. MENNELLE. *On the Rhodesian Diamond fields* (Tr. geol. Soc. S. A., t. 11, 43 à 45). — 1909. P. A. WAGNER. *Die Diamantführenden Gesteinen Sud Afrikas* (1 vol., Bornträger, Berlin). — 1909. HANS MERENSKY. *The diamond deposits of Luderitzland* (German S. W. of Africa, t. 12, p. 13 à 24). — 1911. STUTZER. *Die wichtig. Lagerst. der Nichterze*, p. 89 à 184. — Rapports annuels des Sociétés de Beers Consolidated, Jagersfontein, Premier, Robinson diamond, etc. — Transactions et proceedings of the geological Society of South Africa depuis 1898. — Annual Reports of the geological Commission. Cape of Good Hope.

¹ Les noms de ces mines proviennent : l'un de celui du propriétaire, de Beer ; les trois autres de ceux des fermes.

Puis, en 1872, on dut créer une servitude de passage ; tous les claims de rang pair furent transformés en une route, avec des files de poteaux munis de poulies destinées à l'extraction des claims de rang impair. Les champs miniers prirent l'apparence d'une série de fossés parallèles séparés par des murs étroits portant des routes : murs qui s'éboulaient de temps à autres en précipitant hommes, chevaux et voitures au fond des vides. Après divers accidents de ce genre, on renouça au système et on établit des câbles va-et-vient inclinés allant jusqu'au bord de l'excavation. Vers 1874, la carrière à ciel ouvert de Kimberley présentait l'aspect d'une ruine fantastique avec ses innombrables trous carrés d'inégale profondeur et le réseau de 1 600 câbles flottant dans l'air¹.

Mais, comme chacun avait intérêt à se débarrasser de son eau et de ses éboulis dans les claims contigus, on s'efforçait de rester toujours un peu en retard sur ses voisins ; en outre, on exagérait la raideur des talus. Il en résulta, en 1882, une succession d'écroulements, à la suite desquels l'exploitation se trouva momentanément suspendue et un affolement complet de la spéculation, qui s'était portée avec frénésie sur ces mines.

C'est alors que, sentant la nécessité d'organiser une exploitation unique avec des installations modernes de puits et galeries souterraines, les petits exploitants fusionnèrent en groupes de plus en plus étendus, concentrés finalement dans les seules mains de la compagnie de Beers (1888-1890). Celle-ci acquit peu après un cinquième grand gisement, celui de *Wesselton*, trouvé en 1890 au voisinage des premiers, s'assura le contrôle de la mine *Jagersfontein*, située plus loin dans l'Etat d'Orange et, grâce à une puissante organisation financière et commerciale, détint, pendant quinze ans, le monopole exclusif du commerce diamantifère dans le monde. Afin de ne pas exagérer la production, elle ne laissa ouvertes, jusqu'en 1901, que ses mines de Kimberley et de Beers ; puis elle rouvrit successivement les autres devant l'appauvrissement des premières. Mais, en 1909, elle a fermé de nouveau les mines de Beers et Dutoits Pan.

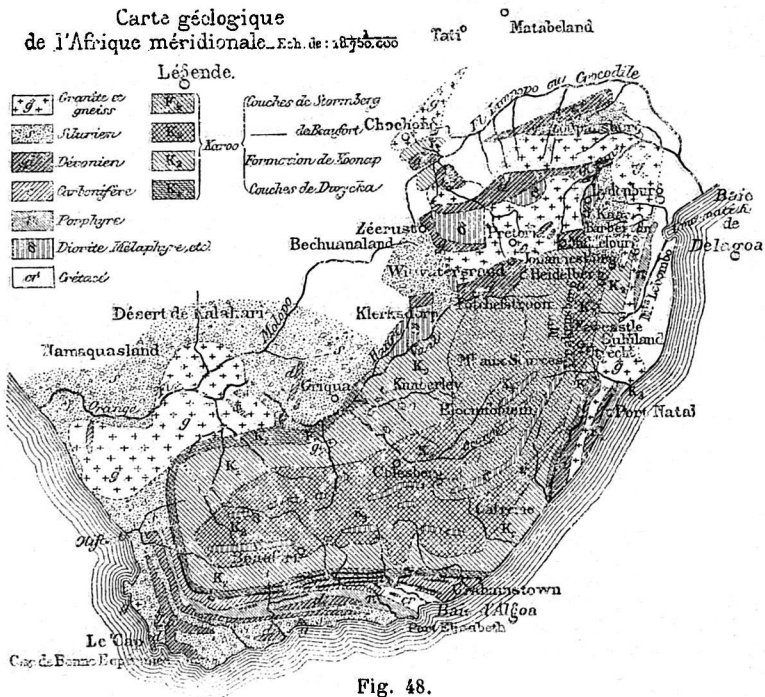
Pendant les cheminées diamantifères analogues à celles de Kimberley sont fort nombreuses dans l'Afrique du Sud. Après en avoir essayé vainement une multitude, on a fini par en trouver une comparable à celles de Kimberley : le gisement de *Premier*, près de Prétoria (fig. 49), qui fait aujourd'hui une concurrence sérieuse à la de Beers.

Cette mine, dont le gouvernement du Transvaal s'est réservé les deux tiers, produit de grandes quantités de diamants secondaires, mais semble s'appauvrir vite en profondeur.

Géologie. — L'Afrique du Sud, comporte, on le sait (fig. 48), une très grande plate-forme primitive, à laquelle ont dû s'adosser, vers le Transvaal, des plissements primaires, et sur laquelle se sont déposés en stratification horizontale, depuis le carbonifère supérieur jusqu'au lias, les terrains lacustres avec couches charbonneuses, tous semblables entre eux sur 2000 m. d'épaisseur, auxquels on donne le nom de *Karoo*. Les bassins, où se sont entassés ces terrains, ont dû subir un affaissement progressif concomi-

¹ J'ai reproduit, dans mon ouvrage sur les *Diamants au Cap*, des photographies de l'exploitation à diverses époques.

tant de la sédimentation, qui a permis ces accumulations énormes de couches toutes semblables et offrant toutes des caractères continentaux incompatibles avec l'existence d'un premier bassin profond. En rapport avec ces déplacements verticaux se sont produites des dislocations et ouvertes des cheminées éruptives, ou des fractures filoniennes, par lesquelles sont montées des roches basiques, que l'on trouve de tous côtés intercalées en nappes intrusives (ou effusives) dans la formation sédimentaire. Nous aurons plus tard à parler des gisements d'or, d'étain, etc., situés dans la plate-forme primitive et dans les chaînes plissées du soubassement



au Transvaal, dans la Rhodésia, etc... Les diamants se trouvent exclusivement dans certaines cheminées éruptives recoupant à l'emporte-pièce (avec rebroussement au contact) les terrains horizontaux du Karoo. Les roches de ces cheminées diamantifères, composées d'une brèche péridotique ou Kimberlite, sont, là où on les rencontre, à la fois les plus basiques et les plus récentes de la série avoisinante.

Tout ce massif sud-africain est ensuite resté homogène et stable jusqu'aux dislocations de la fin du jurassique qui ont amené, sur ses rivages, mais uniquement sur ceux-ci, le dépôt des diverses couches crétacées.

Sans insister sur cette géologie générale que nous croyons aujourd'hui suffisamment connue¹, on doit remarquer aussitôt sa grande analogie

¹ Nous en avons donné un exposé d'ensemble dans les *Mines d'or du Transvaal*, Paris, 1896, p. 159 à 177.

tectonique avec celle des autres grandes plates-formes primitives, où l'on a trouvé également le diamant. La ressemblance est complète avec l'Inde, où les dépôts du Gondwana équivalent à ceux du Karoo Sud-Africain. Elle est encore frappante avec le Brésil et, sur les autres plates-formes primitives similaires du globe, qui ne sont pas connues comme gisements dia-

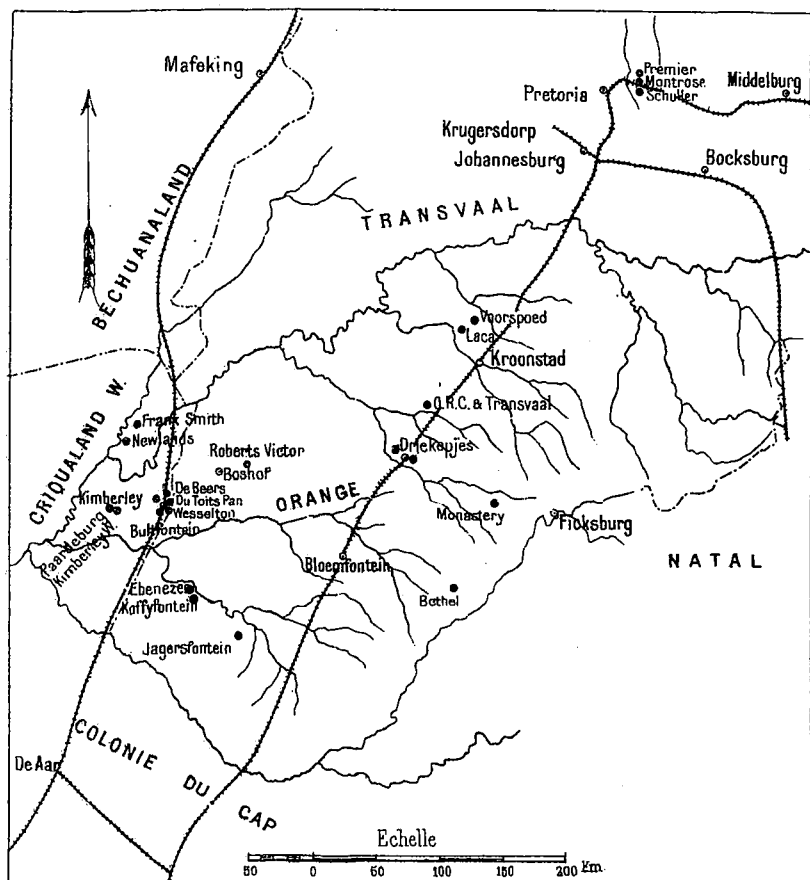


Fig. 49. — Carte de la région diamantifère de l'Afrique Australe, d'après Wagner.

mantifères utilisables, le Dominion Canadien, le continent de l'Angara Sibérien, le massif Sinien de la Chine septentrionale, nous verrons que l'on a signalé, à diverses reprises, des cristaux isolés de diamants.

Cheminées diamantifères¹. — Les cheminées éruptives contenant du

¹ Les cheminées diamantifères du Cap ont été étudiées à bien des reprises. Mais leur aspect très singulier au début et le soin avec lequel les propriétaires se sont toujours attachés à dissimuler les conditions de gisements pour éviter la découverte de mines concurrentes, ont contribué à bien des erreurs, qui se reproduisent encore de livre en livre et qu'il est, à ce titre, utile de signaler. C'est ainsi que la grande quantité de blocs étrangers englobés dans la roche diamantifère (floating reefs) a fait imaginer

diamant en quantité suffisante pour donner lieu à une exploitation rémunératrice sont, nous l'avons dit, fort rares, même dans la région diamantifère de l'Afrique du Sud. Le groupe de beaucoup le plus important (celui de Kimberley) se résume en une seule trainée Nord-Sud d'une dizaine de km. (fig. 50). Mais de semblables cheminées, où le diamant existe dans les mêmes conditions en petites quantités, sont, au contraire, innombrables¹. Il est parfois arrivé, notamment sur le Vaal, qu'un remaniement de ces affleurements diamantifères, soit sur place, par une éluvion glaciaire, soit à distance, par érosion et alluvionnement, ait donné des produits suffisamment enrichis pour être exploités. Les petits filons pauvres, dont la dimension peut ne pas dépasser quelques mètres, ont pu être parfois géologiquement examinés avec plus de liberté que les grandes mines, où l'on avait un trop gros intérêt financier à dissimuler la réalité et apportent une utile contribution à l'étude de celles-ci, qui est elle-même aujourd'hui suffisamment précise. Si l'on reste sur le terrain pétrographique, on peut ajouter que ces conditions de gisement sont très analogues à celles qui se reproduisent, en une foule de pays, pour des familles de roches analogues,

auxquelles il manque seulement l'élément utile, dont les conditions de formation en quantités un peu notables n'ont évidemment été que très exceptionnellement réalisées : par exemple, la série des trapps de l'An-

d'abord les théories bizarres d'alluvions éruptives (?), puis a fait dire que la matrice du diamant proprement dite était inconnue, enfin a donné lieu à une série de confusions pétrographiques, dans lesquelles les auteurs se sont trouvés étudier un bloc étranger pour la roche mère. Notamment Fouqué et Michel Lévy ont décrit, en 1879, comme la roche diamantifère, un fragment de la diabase que celle-ci recoupe près du jour et y ont signalé, dans une communication à l'Institut, la présence d'un diamant microscopique, attribuable à une erreur d'examen.

¹ J'en ai signalé un certain nombre dans les *Diamants du Cap*, p. 62 à 70 et les *Richesses minérales de l'Afrique*, p. 205.

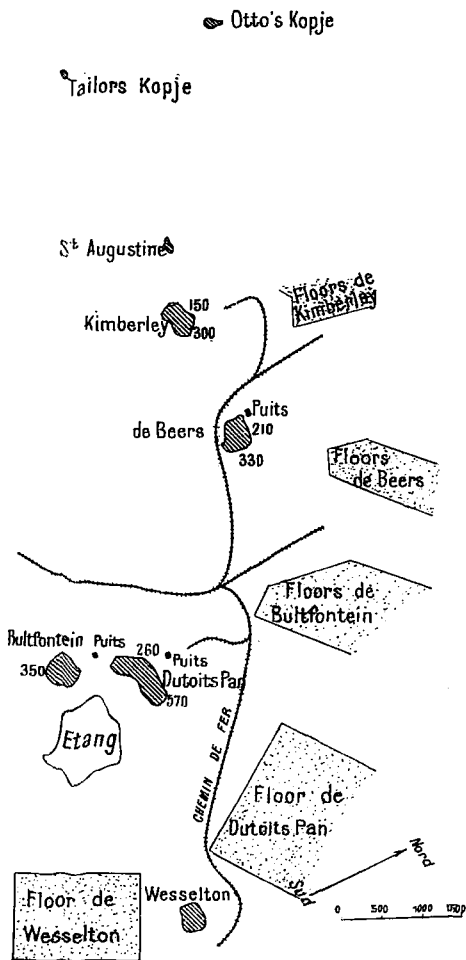


Fig. 50. — Plan des cheminées diamantifères de Kimberley.

gara, ou, plus près de nous, celle des porphyrites, diabases ophitiques et microgranulites que l'on trouve si fréquemment sur la chaîne hercy-

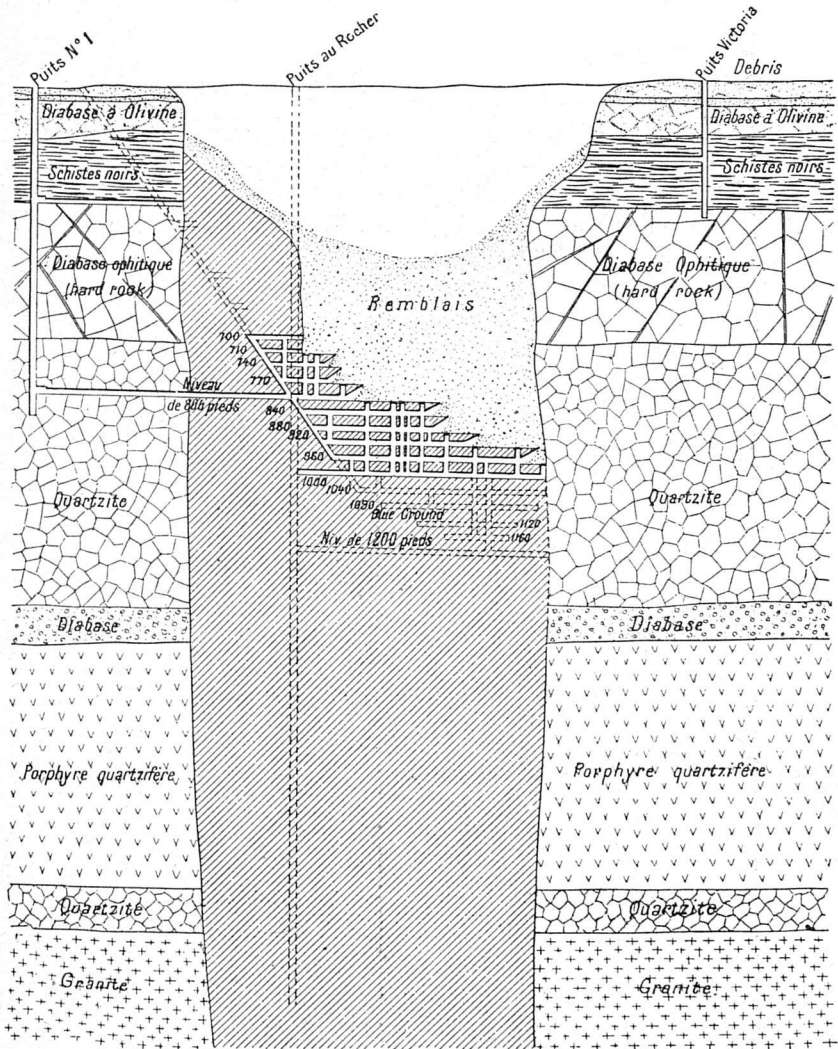


Fig. 51. — Coupe Est-Ouest de la mine de Beers. Echelle au 1/5120°. Les dépilages n'ont été représentés que jusqu'en 1896.

nienne, dans la région cuprifère des mines de Rio-Tinto, autour des bassins houillers du Plateau Central, etc.

Les principales mines exploitées, groupées autour de Kimberley, sont représentées par la figure 50. Nous signalons notamment celles de Kimberley¹, de Beers, Bultfontein, Dutoits Pan, Wesselton.

¹ Il ne faut pas confondre cette mine avec le district du même nom.

Chacune des cheminées exploitées comporte une colonne cylindrique de péridotite à pyroxène, ou kimberlite, traversant à l'emporte-pièce des strates horizontales de terrains, avec lesquels sa formation n'a aucun rap-

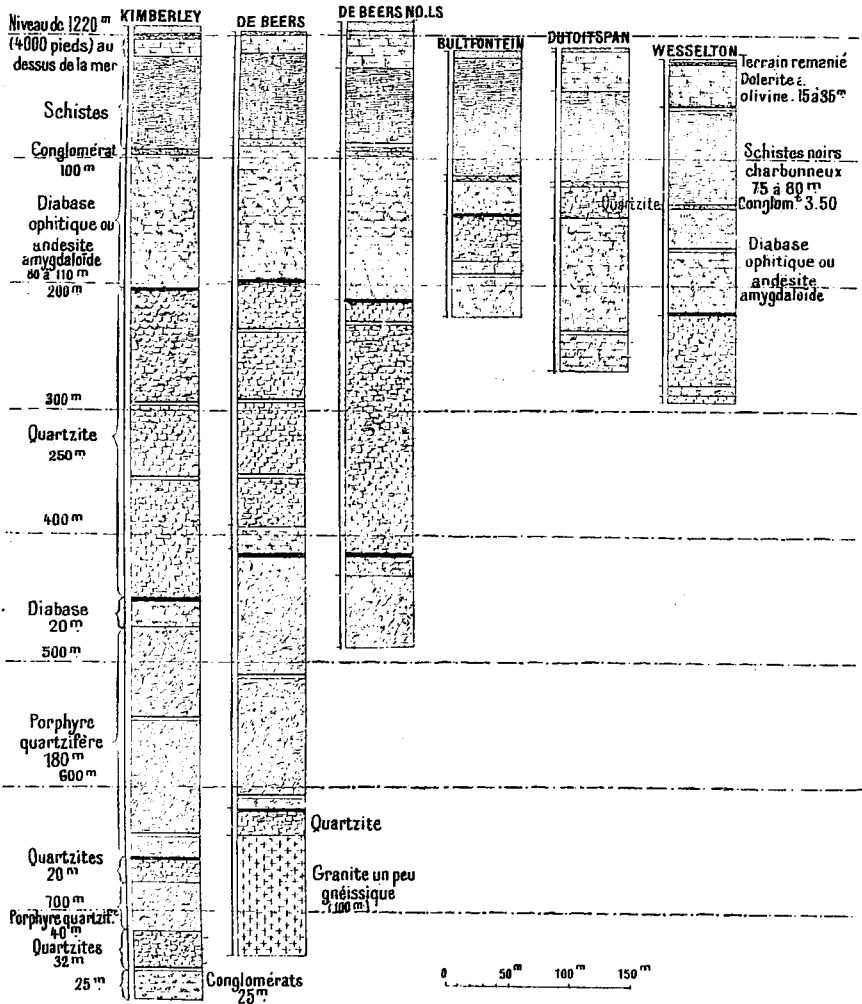


Fig. 52. — Coupes comparées des diverses cheminées diamantifères de la région de Kimberley en 1907.

port direct et que l'on voit souvent rebroussés, polies et striées sur le contact par la poussée venue manifestement d'en bas. Ces cheminées (fig. 51) sont parfois complètement circulaires; ailleurs, elles s'allongent en plan suivant une direction quelconque en forme de dykes ou de filons. En coupe verticale on y observe des modifications analogues, que l'on a surtout remarquées quand elles déterminent, comme à Kimberley, une réduction progres-

sive de la surface exploitable, mais qui ne paraissent obéir à aucune loi. Leurs dimensions horizontales dans les grandes mines varient de 100 à 600 m. ; ailleurs, il existe des filons de 7 à 8 m. de large sur 1 500 m. de long.

. Si nous considérons d'abord les terrains encaissants, dont la figure 52 donne la coupe dans les divers puits de la C¹e de Beers, nous voyons qu'il s'y présente des alternances de sédiments, schistes, quartzites ou conglomérats et de coulées éruptives. Celles-ci, comme le montrent les coupes comparées entre elles, peuvent varier, dans une certaine mesure, de position et d'épaisseur, même à la très faible distance qui sépare les uns des autres les mines de la de Beers. Ce caractère paraît conforme à l'idée suggérée par leur examen pétrographique, qu'il ne s'agit pas, en général, de véritables coulées répandues au jour, et contemporaines des couches encaissantes, mais, plus probablement, de nappes intrusives. La coupe des terrains encaissants peut se ramener schématiquement aux termes suivants :

Terrain remanié	10	mètres.
Diabase à olivine (dolérite anorthique à olivine)	15 à 35	—
Schistes noirs charbonneux	75 à 80	—
Conglomérat	3 ^m ,50	
Diabase ophitique ou porphyrite andésitique (andésite) amygdaloïde	80 à 110	—
Quartzites	250	—
Diabase ou porphyrite	20	—
Porphyre quartzifère	180	—
Quartzites	20	—
{ Porphyre quartzifère	40	—
{ Quartzites	32	—
{ Conglomérats, assimilés à ceux du Vaal	25	—
Granite		

Les trois termes inférieurs, réunis par une accolade, qui existent à la mine Kimberley, sont remplacés, 1500 m. plus loin, à la mine de Beers, par du granite un peu gneissique, recoupé dans le puits sur 100 m. de haut au milieu de 1908.

Au sujet de ce granite, dont l'importance théorique est considérable, il faut remarquer que les rapports venus à notre connaissance, où l'on mentionne sa recoupe dans le puits sur 100 m. de haut², ne nous renseignent pas nettement sur ce qui s'est produit, à ce moment, dans la cheminée même. Néanmoins, il paraît bien en résulter que celle-ci se continue à travers le granite, comme on le voit ailleurs pour des montées de roches semblables.

Le long du contact, nous venons de signaler le rebroussement fréquent des strates encaissantes et, sur la surface de contact parfaitement polie, la présence de stries comparables à des stries glaciaires, tracées

¹ La dolérite est l'équivalent des diabases à olivine; mais le terme a été plus fréquemment employé pour les roches tertiaires.

² Rapport de la de Beers pour 1908, p. 29 et pl. IV. En juillet 1908, la de Beers a été arrêtée à 740 m. de profondeur. La Kimberley a atteint, en 1911, 808 m. et on y fonce le puits jusqu'à 1050 m.

par des rocs durs encaissés dans la péridotite au moment de son éruption.

En d'autres régions de l'Afrique australe, de semblables cheminées diamantifères recourent, non pas la série du Karoo, mais les terrains primaires sous-jacents (Est de Prétoria)¹.

Roche diamantifère. — La roche diamantifère, sur laquelle on a tant discuté, est aujourd'hui bien connue (fig. 53). C'est, d'habitude, une péridotite à pyroxène serpentinisée pouvant, dans la région de Prétoria, passer à une pyroxénite à olivine, parfois avec mica noir². Cette roche englobe de nombreux fragments des roches encaissantes (floating reefs), que son éruption a, comme je l'ai montré autrefois³, remontés en moyenne d'au moins 200 m. et partiellement de 6 à 700 m., au-dessus de leur point d'ori-

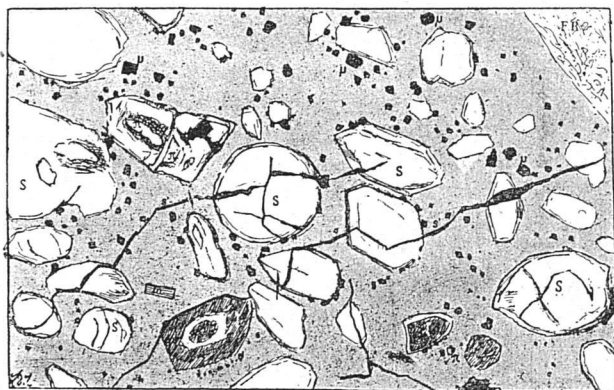


Fig. 53. — Brèche diamantifère du Cap examinée au microscope. Grossissement 20 diam.
 π. péridot non altérée. — μ. magnétite. — S. serpentine. — S'. veinules de serpentine. — m. mica noir
 l. limonite. — F.R. floating reef, fragment de roche étrangère.

gine et qu'il faut se garder de confondre avec la roche mère du diamant. Au microscope, on voit, dans celle-ci, des cristaux inaltérés de péridot et de pyroxène salite englobés dans une pâte serpentinisée, avec beaucoup d'autres cristaux serpentinisés paraissant avoir appartenu aux deux mêmes minéraux (certains de ces cristaux ayant des fissures pleines de bastite), une très grande abondance de magnétite souvent chromifère, et de la limonite qui en dérive.

Les grenats y sont fréquents, et l'on a trouvé exceptionnellement des diamants dans des nodules de pyroxène et grenat. Il existe également du mica noir, de l'enstatite, du zircon, du diopside chromifère, du disthène (minéral assez habituel dans les écoligites), de la tourmaline, etc.

¹ Voir plus loin page 421.

² L'abondance du grenat et du pyroxène a conduit certains pétrographes à y voir un dérivé des écoligites; mais le rôle du péridot me paraît dominant à Kimberley. Il est fort possible, d'ailleurs, que la roche varie quelque peu d'un point à l'autre.

³ Voir les *Diamants du Cap*, p. 101 et 119. J'ai pu, en parlant de cette observation prédire dans cet ouvrage (p. 119 et suiv.) dix ans à l'avance, la rencontre du granite, qui a été effectuée dans les puits de Beers à peu près à la profondeur prévue (Voir C. R., 2 août 1897 et 9 déc. 1907). C'est, je crois, la preuve la plus convaincante de la théorie éruptive.

Cette roche, qui porte le nom local de « blue ground », a subi, sur une vingtaine de mètres à partir de la surface, une altération analogue à celle que l'on réalise artificiellement sur les terrains de dépôt ou « floors » pour extraire le diamant. Elle a ainsi donné le « yellow ground », avec sensible enrichissement en diamants¹. Mais, en outre, jusqu'aux plus grandes profondeurs atteintes, soit aujourd'hui 808 m., la roche même reste serpentinisée et se présente ainsi à nous avec des caractères d'altération profonde et magmatique par une intervention probable de la vapeur d'eau qui a accompagné l'éruption.

Le diamant, irrégulièrement réparti dans cette roche, comme nous allons le voir, y est accompagné de graphite et d'hydrocarbures.

Ces diamants sont apparemment des éléments constituants de la kimberlite. Ils ont néanmoins subi un déplacement depuis leur cristallisation ; car on en trouve de brisés dans la roche en place, comme cela se produit pour tous les éléments de première consolidation. On peut donc rattacher leur formation à un phénomène relativement profond. Les arguments, sur lesquels on s'est parfois appuyé pour admettre leur cristallisation dans le seul ciment consolidé en dernier lieu, à l'exclusion des noyaux emportés d'en bas, paraissent fort peu convaincants².

On est ainsi conduit à l'idée de carbone, soit en dissolution dans un magma basique, soit en vapeurs hydrocarbonées sous pression associées à la même roche, ayant cristallisé sous pression dans un brusque refroidissement connexe de la montée vers le jour.

Les observations faites sur ces cheminées conduisent donc à se représenter leur formation de la manière suivante. Il y aurait eu ouverture explosive de cheminées trouées à l'emporte-pièce dans les conditions que Daubrée a reproduites expérimentalement en perforant des plaques d'acier par des explosifs et qui semblent avoir été fréquentes dans les phénomènes éruptifs de toutes les époques³. Puis il se serait élevé, dans la cheminée ouverte, la scorie d'un magma profond qui était une péridotite augitique : scorie serpentinisée en profondeur et entraînant des débris de cristaux consolidés, diamant, olivine, pyroxène, etc.... Cette montée intrusive sous forte pression a emporté, dans son ascension, des débris des parois encaissantes et les a souvent remontés d'une hauteur qui, nous l'avons vu, dépasse 200 m.

On s'est demandé, à ce propos, s'il y avait eu cratère ouvert au niveau de la surface actuelle et si les conditions de cristallisation n'avaient pas

¹ Très exceptionnellement, sur une petite cheminée située près de la mine Premier, il existe à la surface, d'après Moule, de gros blocs de kimberlite inaltérée.

² On doit même mentionner une hypothèse possible, quoique peu probable : celle où le diamant aurait été simplement emprunté par l'éruption péridotique à la traversée de son soubassement granitique (rencontré dans la de Beers) ; ce qui changerait entièrement les idées sur son mode de formation et nous ramènerait à l'idée d'une cristallisation acide, analogue à celle que l'on a rapportée au Brésil. Certains minéraux associés avec le diamant, comme la tourmaline, paraissent bien avoir cette origine. Mais, en dehors d'autres objections, il semble très invraisemblable que les 200 cheminées diamantifères de l'Afrique australe, composées de roches analogues, aient, par une singulière coïncidence, trouvé en profondeur des veines diamantifères. Quelques-unes de ces cheminées passent à des filons.

³ *Les Diamants du Cap*, p. 99.

rapidement varié à partir de cette surface. On nous paraît oublier là, comme on le fait si souvent, la profonde dénivellation produite par les érosions. Pour nous, tout ce que nous voyons de la cheminée correspond à une zone, qui, au moment de son remplissage, était profonde et où la cristallisation s'est faite indépendamment de la surface, donc avec une homogénéité applicable à de grandes hauteurs¹.

Cette conclusion pourrait, il est vrai, être inexacte si les venues diamantifères du Cap appartenaient à une venue éruptive presque contemporaine, à un véritable volcanisme. Et il est certain que, dans ce cas particulier, nous ne connaissons avec certitude aucune limite d'âge supérieur pour ces cheminées que nous voyons atteindre la superficie en traversant tous les terrains représentés. Les vraisemblances sont cependant pour que la kimberlite se rattache aux autres venues analogues, mais moins basiques, qui l'accompagnent partout en s'intercalant dans la série du Karoo, et avec lesquelles elle présente, comme je l'ai montré autrefois, de remarquables analogies de composition².

Enfin, comme dernière observation sur la roche diamantifère, nous ferons remarquer son caractère particulièrement basique, qui a déterminé la cristallisation abondante de la magnétite et celle du fer chromé, soit dans la magnétite, soit dans le diopside.

Répartition des diamants. — La kimberlite contient, en proportions très variables suivant les points, des diamants qui sont également de qualités très diverses. Dans une même mine, en section horizontale, la teneur varie; elle se modifie également beaucoup, quoi qu'on en ait dit, en coupe verticale. Je ne crois pas qu'il résulte, des observations faites jusqu'ici, aucune preuve d'une loi théorique amenant, soit un enrichissement général, soit un appauvrissement en profondeur, quoique le second fait ait été le plus fréquent. On ne doit pas oublier à ce propos, quand on sort du domaine industriel pour se restreindre au domaine scientifique, qu'une mine très riche a beaucoup plus de chances pour s'appauvrir que pour garder la même teneur et que ces appauvrissements, qui lèsent de gros intérêts, y sont particulièrement remarquables, surtout quand ils se trouvent coïncider, comme à la Kimberley, avec une réduction de la section exploitable. Si on laisse de côté la zone d'altération superficielle, ou yellow ground, pour laquelle l'enrichissement est manifeste, mais d'origine secondaire, on a observé, par exemple à la de Beers, une augmentation jusqu'à 100 m., puis une certaine constance, puis une forte diminution vers 600 m. Nous donnons plus loin un tableau montrant les variations de la teneur moyenne des minerais de la Kimberley et de la de Beers, qui ont été seuls exploitées de 1888 à 1897 par la C^{ie} de Beers. Ces teneurs sont comp-

¹ On a trouvé, à Wesselson, dans le blue ground, des blocs de charbon et même, paraît-il, un schiste renfermant un poisson fossile, tombés de couches supérieures aujourd'hui disparues.

² Il serait fort intéressant, à ce propos, d'avoir des déterminations précises faites à des niveaux de plus en plus profonds pour examiner les variations qui peuvent s'y produire. Les venues diamantifères ont commencé très anciennement puisque les conglomérats du Witwatersrand en renferment des produits remaniés (voir plus loin p. 421). Parmi les roches à diamants de l'Afrique Australe, on peut aujourd'hui compter très accessoirement des éclogites et des basaltes à mélilitite.

tées, suivant l'usage local, par carat au load de 16 pieds cubes (0,452 m³ ou 1 280 kg.)¹ et, pour les convertir en grammes à la tonne, il faut multiplier par 0,156. On y voit la teneur moyenne partir de 1,28 k. en 1888, descendre à 0,92 k. en 1892, remonter à 1,05 k. en 1893, puis, avec quelques légères fluctuations, s'abaisser progressivement jusqu'à 0,37 k. en 1908. Sans doute ces chiffres seraient à rectifier en tenant compte du progrès dans les procédés industriels qui a permis d'utiliser certaines parties pauvres considérées autrefois comme sans valeur. Néanmoins l'appauvrissement est ici incontestable. A la mine Premier, on a eu également une chute très considérable de 1,29 k. en 1903 et 0,798 k. en 1904 à 0,25 k. en 1908 et 0,213 k. en 1911. Par contre, à Bultfontein, on est parti de 0,21 k. en 1902 pour monter à 0,41 k. en 1905 et retomber à 0,38 k. en 1909. A Wesselton on oscille, depuis 1898, entre 0,27 k. et 0,30 k. et, en 1909, on a atteint 0,34 k. A Jagersfontein, la teneur est seulement de 0,11 k. Elle descend à 0,06 k. dans la Robinson mine.

De toutes façons, on remarquera combien est faible cette teneur dans des mines dont l'exceptionnelle richesse frappe les imaginations. Il faut maintenant fouiller, en moyenne, une vingtaine de tonnes de roches (au moins 6 m³ de roche abattue ou 3 m³ de roche en place) pour rencontrer 1 gramme de diamant. Certaines mines ont la spécialité des très petits diamants comme la Premier; d'autres ont des diamants de qualité supérieure comme Dutoitspan.

Industrie et traitement. — L'exploitation des cheminées diamantifères se fait aujourd'hui le plus souvent par une méthode d'exploitation profonde, avec puits au rocher latéral, galerie de niveau, dépilage par tranches horizontales et remblayage, comme pourrait se faire celle d'une matière pierreuse quelconque. Une fois la roche extraite, on commence par la laisser se désagrèger à l'air sur des terrains appelés floors en faisant passer sur les dépôts des herses et des rouleaux cannelés, de manière à accélérer la réduction en boue. Puis on soumet les parties dures du minerai à des broyages progressifs alternant avec des triages et enfin des appareils de préparation mécanique et de concentration très perfectionnés, analogues à ceux qui servent pour les minerais, en extraient un sable diamantifère concentré, qui est soumis à des triages à la main.

Nous donnons ci-joint, deux tableaux : le premier relatif à l'ensemble des quatre grandes mines de Kimberley avant leur absorption par la de Beers, le second relatif aux deux mines de Beers et Kimberley depuis 1896². Ces mines ont produit, de 1888 à 1908, en vingt ans, 34 782 454 carats, ou 7 130 kg. valant 1 437 600 000 fr. Le load (ou wagonnet) lavé représente une valeur qui, depuis longtemps, se maintient autour de 30 à 35 fr. ³.

Les frais d'extraction et de lavage correspondants sont de 9 à 11 fr. En y ajoutant les frais généraux et l'amortissement, on peut compter 11 à 13 fr.

A ces deux mines se sont ajoutées, depuis quelques années, Wesselton,

¹ Ces 0,452 m³ de minerai abattu correspondent à 0,288 m³ de roche en place.

² Ce tableau complète celui de 1888 à 1896 que l'on trouvera p. 176 dans nos *Diamants du Cap*, auquel nous renvoyons pour tous les détails. Il ne faut pas oublier que, dans les dernières années, il représente seulement une partie du travail de la de Beers.

³ Rappelons que le load représente 16 pieds cubes ou 1280 kg.

TABLEAU 16. — PRODUCTION DES MINES DE DIAMANTS DU CAP DE 1882 A 1887

ANNÉES	KIMBERLEY		DE BEERS		DU TOIT'SPAN		BULT-FONTEIN		PRODUCTION TOTALE		VALEUR moyenne.
	Carats.	Francs.	Carats.	Francs.	Carats.	Francs.	Carats.	Francs.	Carats.	Grammes.	Francs.
1882 (4 mois)	380 995	29,9	140 513	27,93	190 148	40,95	143 936	33,4	856 353	175 552 365	33,40
1883.	947 817	22,27	426 728	25,50	435 658	32,90	502 029	25,02	2 312 234	474 007 970	25,475
1884.	642 438	24,65	497 596	29,10	498 550	38,07	566 201	25,92	2 204 786	446 984 130	29,025
1885.	523 774	21,87	566 233	22,05	560 912	30,72	636 340	22,75	2 287 261	468 888 505	24,325
1886.	889 864	24,80	795 895	24,30	700 302	34,85	661 339	24,37	3 047 400	624 717 000	26,75
1887.	1 333 832	26,37	1 014 048	25,20	696 756	35,40	602 246	25,42	3 646 702	747 573 910	27,65

TABLEAU 17. — PRODUCTION DES MINES DE BEERS ET KIMBERLEY (non compris les autres mines de la Société de Beers)
Principaux résultats de l'exploitation de 1896 à 1908 (années de juillet à juillet).

	1896-97	1897-98	1898-99	1899-00 1900-01 1901-02			1902-03	1903-04	1904-05	1905-06	1906-07 1907-08		1908-1909
	Guerre anglo-boer.			Crise américaine.									
Nombre de loads de roche extraits.	2 515 889	3 332 688	3 504 899	1 673 644	2 130 397	2 062 459	2 370 503	2 440 895	2 447 850	2 253 988	2 103 853	1 208 974	490000
Nombre de loads de roche lavés.	3 011 288	3 259 692	3 311 773	1 522 108	2 616 873	1 961 858	2 561 940	2 401 099	2 418 158	2 119 363	1 467 456	1 130 673	
Nombre de carats de diamant (à 205 millig.) trouvés	2 769 422	2 603 250	2 345 466	1 000 964	2 000 495	1 499 299	1 574 189	1 303 525	1 108 980	861 023	543 752	414 121	
Nombre de carats par load	0,92	0,80	0,71	0,67	0,76	0,76	0,61	0,54	0,46	0,41	0,37	0,37	0,42
Valeur du diamant par carat en francs.	33,55	33,10	37,00	44,75	49,45	58,05	60,60	61,15	66,00	76,25	80,90	72,20	58,30
Valeur des diamants extraits en francs.	93 952 400	86 280 300	81 776 500	44 855 500	98 984 300	86 606 100	95 491 300	79 819 700	73 234 700	65 663 300	44 052 000	20 557 100	
Valeur par load en francs	30,85	26,45	26,15	29,40	37,80	44,35	37,20	33,20	30,20	30,90	30,00	26,80	24,45
Frais de production du load extrait (extraction et lavage)	8,65	8,00	8,05	9,35	10,50	10,55	9,05	9,15	9,50	10,20	11,25	8,30	8,40

Bultfontein et Dutoitspan, appartenant à la même société. Wesselton a produit, de 1896 à 1908, 5 462 696 k., valant 222.000.000 fr., avec une teneur de 0,27 à 0,30 k. par load et une valeur au carat, en 1906-1907, de 51,35 fr.

Bultfontein a produit, de 1901 à 1908 : 1 783 288 k. valant 85.481.000 fr. avec une teneur de 0,32 à 0,41 k. par load et une valeur au carat en 1906-07 de 54,35 fr. Enfin Dutoitspan a produit, de 1904 à 1908 : 782 046 k. valant 68.669.000 fr. avec une teneur de 0,23 à 0,26 carats par load et une valeur au carat en 1906-1907 de 99,40 fr.

La Société de la de Beers produit, à elle seule, 66 p. 100 de la production sud-africaine, qui est, en même temps, la production mondiale. En 1908 et 1909, cette société ayant cru devoir arrêter en partie ses mines pour ne pas surcharger le marché, tandis que la Premier poussait son extraction, la production de la de Beers n'a été que 48 p. 100, celle de la Premier 20 p. 100, celle de la Jagersfontein 7 p. 100. Au total, la compagnie de Beers a extrait, en 1908, 5 498 000 loads, et, en 1909, seulement 3 558 000 loads. En 1909-1910, la de Beers a produit 3 014 270 k. à 48,40 fr. et 2 147 000 k. à 57,15 fr. en 1910-1911.

Parmi les sociétés indépendantes de la de Beers, la Premier (Transvaal) a commencé, dans le terrain superficiel décomposé, par de grosses teneurs de 1,29 k. au load. On est rapidement tombé à 0,25 k en 1907-1908 et 0,21 k en 1911, en sorte que la valeur au load est descendue de 46,25 fr. à 4,65 fr. en 1908, 3,90 fr. en 1910; 4,20 fr. en 1911. On y a traité : en 1910-1911, 8,3 millions de loads donnant 1 774 206 k. à 20,20 fr. le k.; soit 35 800 000 fr.

AUTRES PETITS GISEMENTS DIAMANTIFÈRES DE L'AFRIQUE AUSTRALE

Nous nous sommes étendus sur les mines de Kimberley, Premier et Jagersfontein en raison de leur importance industrielle tout à fait prépondérante. Il existe, comme nous l'avons dit en commençant, dans toute l'Afrique Australe, au Transvaal, dans la Rhodésia¹, dans le Sud-Ouest africain allemand, une quantité de petits gisements semblables, tels que la Frank Smith, l'Elandsdrift, la Lace Diamond, la Robinson, la Koffyfontein, la Driekopjes, la Barclay West, etc. Parmi ces gisements, nous ne citerons que ceux présentant un intérêt spécial, géologique ou technique.

Minerais à l'Est de Pretoria — A l'Est de Pretoria, Molengraaff a étudié les gisements de Rietfontein, Kaalfontein, Elansshoek et Franspoort, où la cheminée de péridotite diamantifère recoupe les couches anciennes de la série de Pretoria².

Diamants des conglomérats aurifères. — Dans les produits de broyage des conglomérats aurifères au Transvaal, on a recueilli, à diverses reprises, de petits diamants, notamment aux environs de Klerksdorp. Ce diamant provient sans doute des roches détruites qui ont fourni les quartz des conglomérats et, sa dureté l'a fait se concentrer avec ceux-ci³. Sa présence

¹ On a annoncé en janvier 1912, la découverte de diamants au Congo belge sur le Kasai et le plateau du Kundelungu.

² 1898. Trans. geol. Soc. of South Africa, t. 3, p. 122.

³ Les Mines du Transvaal, p. 304.

prouve toutefois qu'il a existé, dans l'Afrique Australe, des roches diamantifères longtemps avant les venues de Kimberlite.

Diamants du Sud-Ouest africain allemand¹. — On s'est beaucoup occupé en Allemagne de découvertes diamantifères faites dans le Sud-Ouest africain allemand. Les spéculations engagées dans un sens ou dans l'autre rendent assez difficile de démêler la valeur réelle de ces gisements, qui semblent produire en assez grandes quantités de très petites pierres pesant à peine un quart ou un tiers de carat : qualité dont le marché est déjà surchargé. Le premier champ diamantifère trouvé dans cette région en 1907 est au Sud de la baie de Luderitz (Angra Pequena), un peu au-dessus du 26° degré de latitude, entre cette baie et la baie Elisabeth, située elle-même à 60 km. de Luderitz-Bucht. Ultérieurement, en 1909, on a trouvé d'autres plages diamantifères à Pomona, Hollams Bird Island, Conception Bay, etc. Celle de Pomona passe pour donner des pierres plus grosses, ayant une moyenne d'un demi-carat et atteignant 6 ou 8 k. D'après l'Office Colonial Allemand, la production était, à la fin de 1909, de 70 000 k. par mois, valant 2 500 000 fr. et l'on espérait, alors, atteindre 1 000 000 k. par an².

On recueille les diamants sur la côte dans les sables, sans connaître encore en aucune façon le gisement primitif dont les pierres peuvent provenir : cheminée diamantifère recouverte par la mer, ou plutôt longue préparation mécanique effectuée par les vagues sur des produits de destruction empruntés à des affleurements qu'on n'a pas retrouvés³. Les pierres sont, en moyenne, si légères que le vent les emporte avec le sable, en moyenne un tiers de carat ; cependant on en a signalé quelques-unes de 8 à 10 k. Les conditions de vie sont très difficiles. L'eau manque absolument et ne peut être obtenue que par distillation.

DIAMANTS DU BRÉSIL⁴

Historique. — La découverte des diamants au Brésil remonte à 1727. Auparavant, les chercheurs d'or en avaient bien trouvé quelques-uns

¹ *La Nature*, 13 fév. 1909. Rev. S. Afr., 23 janv. 1910 et 21 janv. 1912. — 1911. STUTZER. *Nichterze*. p. 138 avec bibl. et carte.

² Les résultats financiers ont été très médiocres, notamment par suite de l'impôt qui atteint un tiers de la valeur des pierres. On cite, parmi les seules compagnies survivant au début de 1912 après deux ans d'existence : la Colonial Mining (250 000 k.). la German Diamond (180 000), etc.

³ On s'est demandé si ce ne seraient pas des diamants de la région du Vaal apportés par l'Orange (malgré la distance de 800 km.), ou s'il n'y aurait pas eu un premier stade de préparation mécanique datant de l'époque crétacée et ayant produit des grès diamantifères, qui seraient aujourd'hui détruits et remaniés par l'érosion.

⁴ *Coll. Ec. M.*, n° 1816-1852. *Sur l'expl. du diamant dans la prov de Bahia* (Ann. d. M., 5^e, t. 2, p. 594). — 1855-56. DAMOUR. *Rech. sur les sables diamantifères du Brésil* (B. S. G. F., t. 12. — 1857. HEUSSER et CLARY. *Gis. du diamant dans la prov. de Minas Geraes* (Brésil) (Ann. des Min., 5^e, t. 17, p. 289 ; cf. Z. d. D. géol. G., 1860). — 1878. O.-A. DERBY. *A geologia da regioa diamantifera da provincia do Parana no Brazil* (Arch. do Mus. nac. do Rio-de-Janeiro, t. 3). — 1879. O.-A. DERBY. *On the Diam. reg. of Parana* (Brazil) (Proc. of am. phil. Soc., t. 18, p. 251. Newhaven). — 1880. DOLL. *Zum Vork. des Diamants im Itakolumite Brasiliens und in den Kopjen Africas* (Verh. K. K. geol. Reichs. Vienne). — 1881. O.-A. DERBY. *Observações sobre algumas rochas diamantiferas da prov.*

dans le lavage des sables, mais sans en soupçonner, ni la véritable nature, ni la valeur.

Les premiers arrivages de diamants du Brésil amenèrent, dans le commerce des diamants, une crise, pendant laquelle les joailliers, pour se défendre, imaginèrent de nier la valeur et jusqu'à l'existence de ces diamants nouveaux, qui, selon eux, avaient dû être d'abord frauduleusement apportés de l'Inde.

Jeffries, un célèbre joaillier de Londres, écrivait, vers 1740, dans son *Traité des diamants et des perles* : « On ne pourra jamais fixer la valeur du diamant en Europe, si l'on n'abandonne pas la fausse idée que l'on a que les mines du Brésil en fournissent. » Peu après, le Brésil devenait, pour longtemps, le principal, puis le seul centre important de production diamantifère dans le monde.

L'exploitation, qui a eu environ un siècle de vie active, a pu donner environ 12 millions de carats, ou 2,5 t. de diamants, représentant environ 500.000.000 fr., production ainsi décomposée :

Diamantina	(1723 à 1772	2 000 000 carats.
	(1772 à 1843	2 000 000 —
	(1843 à 1885	1 500 000 —
Autres gisements de la province de Minas	» »	1 500 000 —
La Chapada (Bahia)	1840 à 1850	1 000 000 —
	1850 à 1885	1 500 000 —
Canavieiras (pour mémoire)		
Total		9 500 000 carats.
Vols et fraude		2 500 000 —
Total		12 000 000 carats.

do Minas Geraes (Arch. do Mus. nac. do Brazil, t. 4, p. 121). — 1881-82. GORCEIX. *Sur les gîtes diamantifères de la province de Minas Geraes* (Brésil) (B. S. G. F., 3^e série, t. 10, p. 134). — 1881. GORCEIX. *Riquezas mineraes da provincia de Minas* (Ouro Preto). — 1881. GORCEIX. *Sur les gisements diamantifères de Minas Geraes* (C. R., t. 93). — 1882. GORCEIX. *Sur les gisements du Brésil* (B. S. M., t. 3 et 5; R. Sc., 6 mai 1882). — 1882. ORVILLE-DERBY. *Mode of occurrence of the diamond in Brazil* (Am. J. of Sc., t. 24 p. 34. Newhaven). — 1883. GORCEIX. *Gisement de Diamant de Grao Mogor* (B. S. G. F., 3^e, t. 12; cf. C. R., 98, p. 1016 et 1446). — 1884. GORCEIX. *Notitia sobre os cascalhos diamantiferos* (An. da Esc. min. de Ouro Preto, p. 197). — 1884. GORCEIX. *Estudo dos mineraes que acompanhão o diamante na jazida de Salobro* (Ann. Esc. min. de Ouro Preto, p. 219). — 1884. DE BOVET. *L'ind. minérale dans la prov. de Minas Geraes* (Ann. des Min., 8^e, t. 3). — 1884. DE BOVET. *Note sur une expl. de diamants près Diamantina* (Ann. des Min., 8^e, t. 5). — 1884. GORCEIX. *Etude des min. qui accomp. le diamant dans le gis. de Salobro* (Brésil). — 1885. GORCEIX. *Lettre sur l'Itacolumite* (B. S. G. F., 3^e série, t. 13, p. 272). — 1886. CHATRIAN. *Sur le gisement de diamants de Salobro* (Brésil) (Bull. Soc. franç. min., t. 9, p. 302). — 1887. GORCEIX. *Sur le gisement de diamants de Geraes* (Brésil) (C. R., t. 105, p. 4139). — 1891. GONZAGA DE CAMPOS. *Jazidas diamantiferas de Agua Suja* (Bagagem), 52 p. et carte. — 1894. FR. DE PAULA OLIVEIRA. *Mineracao do diamante « Poco do moreira »* (Rev. ind. de Minas Geraes, 15 mai). — 1895. CALOGERAS. *Gisements diamantifères d'Agua Suja* (Rev. ind. de Minas Geraes, janv. et fév. Rev. ind. des mines, t. 39, p. 4-21. Z. f. pr. Geol., 1896, p. 413). — 1897. L. DE LAUNAY. *Les Diamants du Cap*, p. 195 à 209. — 1898. ORVILLE A. DERBY. *Brazilian evidence on the genesis of the diamond* (Journal of geol.), Cf. Z. f. pr. G., 1899, p. 213 à 217). — 1910. HUSSAK. *Der sog. « Favos » der brasilianischen Diamantsande* (Tschermaks min. u. petr. Mitt., t. 18, p. 324-359). — Voir, en outre, Revista Industrial de Minas Geraes depuis 1893 et Anaes de Escola de minas de Ouro Preto. Passim.

Dans ces dernières années, la production est tombée à presque rien, par suite de l'épuisement progressif des gisements et de la concurrence des mines du Cap.

Vers 1880, on comptait encore 5 000 carats par an. On est descendu depuis à quelques centaines.

Centres d'exploitation. — Les exploitations diamantifères du Brésil ont porté sur les deux provinces de Minas-Geraes et de Bahia.

Les gisements les plus importants (fig. 54) sont ceux de *Diamantina* (province de Minas-Geraes), qui ont été décrits par Orville Derby, Gorceix et de Bovet. Cette région diamantifère est située au Nord de Rio-de-Janeiro, à 800 km. de la côte et à 311 km. au Nord d'Ouro-Preto, capitale de la province ; elle forme

une vaste ellipse de 80 km. sur 40, au milieu d'un plateau de 1 100 à 1 200 m. d'altitude, que découpent un certain nombre de vallées, profondément encaissées en cañons, où coulent le Jequitinhonha (Rio Pedras), et ses affluents de gauche : Ribeirão do Inferno, Rio Pinheiro, Rio Caéthé, etc., ainsi que des affluents du Rio San Francisco, qui s'écoule au Nord-Ouest, dans un bassin tout différent.

Des travaux ont également porté sur le groupe *Grao-Mogor*, au Nord-Est du précédent et sur ceux de *Bagagem* et de l'*Abaéthé* au Sud-Ouest.

Dans la province de Bahia, où l'exploitation est beaucoup plus récente, on peut citer *Cincora* et *Salobro* (ou Canavieiras).

D'après Paula Oliveira¹, il ne subsisterait, comme exploitations tout à fait restreintes, dans le Nord



Fig. 54. — Carte des gites diamantifères du Brésil.

de l'Etat de Minas Geraes, que celle du Poçao do Moreira, reprise en 1895 sur le Jequitinhonha, puis celles de Ribeirão do Inferno, Guinda, Boa Vista, Dattas, Barro, Sôpa, Caldeiroes, Rio Pardo grande, Rio Pardo Pequeno et Currallinho. Dans le groupe de Bagagem, se trouve le gisement d'Agua Suja, décrit par Calogeras, où l'on a fait des travaux de 1890 à 1892 et depuis 1895.

Depuis une trentaine d'années, quelques efforts ont été tentés pour rompre avec la routine brésilienne, en installant des exploitations en grand, à l'européenne ; celles-ci ont généralement abouti à des insuccès.

Parmi ces tentatives, on doit citer celle de Portao de Ferro près de Dia-

¹ Rev. ind. de Minas Geraes. Ouro Preto, 15 mai 1894, p. 181. Cf. J. FELICIO DOS SANTOS, *Mem. do districto diamantino da Comarca do Serro* (prov. de Minas Geraes).

mantina, due à de Bovet. En 1893 et 1895, des sociétés européennes ont fait encore un essai semblable à Poçao do Moreira, sur le Jequitinhonha, en un point où diverses sociétés avaient déjà échoué de 1815 à 1817 et en 1862. On a également installé des laveries à Agua-Suja.

La seule chance de succès, dans les exploitations de diamant brésiliennes, semble être aujourd'hui le lavage en grand — par une méthode hydraulique « au géant », analogue à celle qui fonctionne si bien pour l'or en Californie — de toutes les masses d'alluvions pauvres, connues sous le nom de *gorgulho*, qui couvrent les plateaux de Diamantina¹.

Ces alluvions des hauts plateaux dénués d'eau, étant, en effet, d'une teneur trop faible pour avoir pu être exploitées par les anciennes méthodes brésiliennes, sont restées à peu près intactes. Des transmissions électriques de force permettraient, peut-être, aujourd'hui d'y remonter l'eau du fond des vallées et d'obtenir ainsi un traitement relativement économique, nécessaire avec les minerais, tenant, paraît-il, 0,30 à 0,40 k. au mètre cube : chiffre très faible pour le Brésil, mais encore supérieur à celui de la moyenne des mines Sud-Africaines.

a) Gisements d'alluvions. — Les gisements de diamants, que l'on a industriellement exploités au Brésil, sont, presque toujours, des alluvions, dont nous allons indiquer l'allure. Nous décrirons ensuite, pour leur intérêt géologique, quelques gîtes d'une autre nature, d'où le diamant des alluvions semble dériver.

Les alluvions elles-mêmes sont de trois sortes :

1° Dépôts des rivières actuelles, ou *cascalho*, formés par un mélange d'argile et de gravier quartzeux, empâtant des diamants et d'autre minéraux durs, ou *formaços*, avec des galets arrondis ou ovoïdes ;

2° Dépôts à flanc de coteau, ou sur de petites terrasses latérales aux vallées, à 15 ou 20 m. au-dessus du niveau de l'eau, dits de *grupiaras*² ;

3° Dépôts des plateaux, formés de couches horizontales d'un gravier grossier, à éléments souvent presque anguleux, mêlé d'argile rouge, qu'on nomme *gorgulho* et qui recouvre souvent un conglomérat diamantifère, appelé le *taua*.

On peut considérer ces trois catégories de gisements comme s'étant formées successivement, au fur et à mesure du creusement des vallées, dans l'ordre inverse de celui où nous venons de les énumérer.

Tout d'abord, les eaux ont dû couvrir le plateau et y remanier, y concentrer, dans le *gorgulho*, les diamants arrachés aux roches en place, dont nous parlerons ultérieurement.

Puis les rivières, profitant des cassures naturelles du sol, ont commencé à entailler des vallées profondes, ou cañons, en tendant vers leur forme d'équilibre et les diamants, empruntés, soit au *gorgulho*, soit aux gîtes primitifs, se sont concentrés progressivement par une préparation mécanique de plus en plus avancée, d'abord dans les *grupiaras* des terrasses, puis dans le *cascalho* des thalwegs.

Cette dernière catégorie de dépôts, tout au moins, est très récente ; car

¹ Voir plus loin, pages 427 et 428.

² On dit aussi Gupiarras.

on y a trouvé, à diverses reprises, des pointes de flèches en silex, notamment à Bagagem ¹.

Il est évident que, plus nous trouvons le diamant bas dans les vallées, plus il a subi une action des eaux prolongée et plus il a de chances d'être isolé, les autres minéraux moins durs, qui l'accompagnaient au début, ayant disparu par le frottement et l'usure; mais aussi, plus lui-même doit être réduit en petits fragments et émoussé : c'est-à-dire que le *cascalho* des fonds de vallées doit, dans cette hypothèse, comme on le constate en effet, présenter des minerais à teneur beaucoup plus forte que ceux des plateaux, offrant une concentration plus grande des diamants, mais, par contre, des pierres de moindre dimension, donc de moindre valeur.

Dans chacune de ces catégories de gites, le diamant est accompagné par un certain nombre de minéraux, ses satellites habituels, à l'étude desquels on a peut-être attaché trop d'importance pour la genèse du diamant; car ces satellites sont, avant tout, des minéraux du pays, qui, par leur dureté, ont échappé à la destruction ². Cependant il paraît y avoir une association assez remarquable entre le diamant et les minéraux du titane, rutile, anatase, brookite, fer titané, association qui pourrait servir d'argument en faveur d'une théorie énoncée par Gorceix, d'après laquelle le diamant se présenterait originairement, au Brésil, dans des filons de quartz, analogues aux filons aurifères, stannifères et titanifères : ces derniers étant eux-mêmes, comme on le sait, tout à fait assimilables entre eux.

On trouve, en outre, communément, avec le diamant : fer oligiste et magnétite, quartz, disthène, tourmaline et or; puis, moins souvent, grenat, zircon, topaze, staurotide, sphène, tantalite, phosphate d'yttria, monazite et cassitérite, etc.; soit, en résumé, des minéraux, dont le gîte habituel est dans les granulites.

Ajoutons quelques mots sur les trois catégories de gisements mentionnées plus haut.

1° Le *cascalho* des fonds de vallées est loin d'être uniformément réparti dans le lit des rivières. Il y forme, au contraire, une série de poches, de puits (*poças*), de canaux (*canaes*), dirigés suivant la schistosité des terrains du sous-sol, de criques, de marmites de géants torrentielles, appelées *caldeïroes* (chaudières). Comme tous les dépôts d'alluvions (or, étain, etc.) le diamant s'est concentré surtout, à la base des alluvions, sur le lit de roche en place (ou *bed rock*, ici *pisarra*), dans les anfractuosités de celle-ci, qui ont contribué à le retenir et aux points où un remous a amené sa précipitation. Au-dessus de lui, se trouve une épaisseur plus ou moins grande de sables et graviers stériles, qu'il faut commencer par enlever pour le mettre à découvert.

On a, paraît-il, rencontré quelquefois des grottes, autrefois envahies par les eaux, que l'on a trouvées comblées par du *cascalho* d'une

¹ CALOGERAS (Revista industrial de Minas Geraes), 1895, p. 34; on aurait même trouvé des ossements humains à Bagagem et à Agua-Suja.

² Calogeras, dans une étude sur le gisement d'Agua-Suja, insiste sur la différence à faire entre les véritables satellites du diamant, provenant de la même origine et les simples produits de l'érosion des roches traversées par le cours d'eau : ces derniers pouvant varier, d'un gîte à l'autre, avec la constitution géologique de la région d'amont (*loc. cit.*, p. 34).

richesse extraordinaire. Les parois de la roche étaient polies comme du marbre et, à peine la première couche de sable enlevée, on apercevait le sol constellé de pierres précieuses ; certaines de ces poches ont donné jusqu'à 8 et 10 000 k. de diamants.

C'est sur le cascalho qu'ont porté, en somme, presque toutes les exploitations diamantifères du Brésil. Les difficultés de cette exploitation tiennent à ce que, le cascalho étant généralement sous l'eau, il faut commencer par détourner la rivière dans la saison sèche : ce qui, dans ces cañons profondément encaissés, exige toujours des travaux délicats, notamment deux barrages, l'un à l'amont, l'autre à l'aval, pour empêcher les eaux de refluer et un canal de dérivation, presque impossible à maintenir étanche. Or, ces installations, qui ne peuvent être faites que pour une seule saison (car, lorsque les pluies reviennent, elles sont emportées) risquent toujours de tomber sur une partie déjà anciennement fouillée et épuisée. C'est ce qui explique comment l'on a à peu près renoncé, au Brésil, à faire des travaux en grand sur le cascalho.

2° Les *grupiaras* des terrasses ne sont qu'un intermédiaire peu important entre le cascalho des fonds de vallées et le gorgulho des plateaux.

3° Le *gorgulho* forme des couches assez pauvres, bien qu'offrant parfois de gros diamants ; mais il s'étend sur de grandes étendues et n'a jamais été fouillé que très superficiellement, faute d'eau pour désagréger le minerai. Aussi a-t-on eu récemment l'idée d'y travailler avec des jets d'eau, tels que ceux employés pour l'extraction de l'or dans la méthode californienne, cette eau étant remontée des vallées par des machines puissantes ¹.

Dans ce genre de gisements, en partant de la roche du fond, à laquelle on donne uniformément le nom de *pisarra*, on trouve, d'abord, dans les anfractuosités de celle-ci un conglomérat, nommé le *taua*, composé de blocs de dimensions fort inégales et souvent anguleux : par exemple, à Agua-Suja, de grandes plaques de micaschiste aux angles émoussés, des plaques de schiste argileux, des fragments d'amphibolite, de granite, de granulite, de grès, etc... avec un ciment, dans lequel le diamant et ses satellites habituels (oxyde de titane, ilménite, pyrope, magnétite, tourmaline) sont associés à des fragments plus petits des mêmes roches.

Ce *taua* se divise souvent en deux ou trois couches, bien distinctes les unes des autres par leurs teintes.

On peut supposer qu'il s'est formé presque sur place et qu'il correspond à un régime d'érosion puissant, à la suite duquel, les pluies ayant diminué, se déposa, au-dessus de lui, un manteau d'argile plastique (*secundina*) et d'argile ferrugineuse, parfois accompagné encore d'une sorte de conglomérat à gros blocs, l'*estrellado*. Le tout est masqué par 2 à 3 m. de *gorgulho*, c'est-à-dire de gravier quartzeux et par un terrain de recouvrement argileux rougeâtre, qui est presque toujours stérile.

A Pindahibas, dans le gisement de Boa Vista, l'argile superficielle a

¹ C'est sur un gisement de plateau qu'a porté l'expérience récente d'Agua-Suja, près Bagagem. En 1895, on y a installé un *little giant* californien, débitant 40 litres par seconde, avec une portée utile de 24 m., pour une pression de 2 atmosphères. Le jet d'eau lui-même, sans sluice ni canal d'enrichissement, y fait, parait-il, la concentration des diamants, en même temps que l'abatage du *taua*.

3 m. ; le gorgulho, 2 m. ; le taua, 2,50 m. et, à la base de ce dernier, il se retrouve un peu de gravier quartzeux.

Comme indication de teneur, ayant simplement pour but de fixer les idées, à Agua-Suja, Calogeras parle d'une moyenne de 51 mgr. de diamant : soit 0,25 k. par m³ de taua.

b) Gisements primitifs. — Si l'on cherche maintenant à remonter au gisement primitif du diamant brésilien, on constate généralement que les alluvions diamantifères sont en relation avec certains quartzites micacés de l'époque primaire (réputés flexibles, d'après des échantillons exceptionnels), qu'on nomme des *itacolumites* et avec des veines de quartz, renfermées dans ceux-ci. Autour de Diamantina notamment, la relation avec les itacolumites paraît incontestable¹.

Les principaux points, où cette relation a été étudiée, sont ceux de Grao Mogor, Boa Vista, Sao Joao da Chapada, etc...

A *Grao-Mogor*² (à 300 km. Nord de Diamantina), on a exploité, depuis 1827, des conglomérats à galets de quartz associés avec des itacolumites contenant, d'après Gorceix, des diamants intacts, avec de la pyrite martiale et de la martite sans trace d'usure. Il est possible que les diamants soient arrivés là comme dans les conglomérats du Transvaal et dans ceux de l'Inde par destruction de gisements préexistants. Mais telle n'est pas l'opinion de Gorceix, pour lequel les diamants se sont formés sur place, dans de véritables veines de quartz, traversant les conglomérats et sont le produit d'actions filoniennes, qui ont apporté, en même temps, l'or à l'état de pyrite aurifère, les oxydes de titane, la monazite (en quantité remarquablement abondante)³, la tourmaline et l'amphibole : le tout, dans un système de fissures ou de veinules interstratifiées, parfaitement localisé.

La même hypothèse lui semble expliquer la formation du gisement de *Cocaës* (au Nord d'Ouro Preto), où, suivant lui, l'or accompagnerait également des veines quartzieuses, traversant les quartzites micacés.

Des conglomérats diamantifères anciens, analogues à ceux de Grao Mogor, ont été encore signalés par Orville Derby à *Bom Sucesso* et *Boa Vista*.

Enfin, à *Sao Joao da Chapada*⁴, on a extrait, de 1833 à 1840, des diamants, situés, d'après Gorceix, dans une lentille argileuse, provenant

¹ La région de Diamantina est constituée de quartzites, traversés par des veines de quartz. A leur base, ceux-ci deviennent moins grenus, se chargent de mica et constituent les itacolumites, dans lesquelles s'intercalent des couches puissantes d'oligiste (itabirite ou jacotinga), exploitées comme minerai de fer et contenant souvent de l'or (Gongo-Socco, etc...).

Le musée de Rio-Janeiro possède des diamants en place dans cette itacolumite, provenant, pour la plupart, de Grao Mogor, où ces itacolumites ont été exploitées en grand, vers 1840 à 1850. Dufrenoy, dans son traité de minéralogie, décrivait, d'ailleurs, déjà des itacolumites diamantifères. Néanmoins, le fait n'est pas général. A Agua-Suja, d'après Calogeras, le gorgulho est sur des grès jaunes, permocarbonifères ou triasiques, formant le *Chapadao* (plaine de mauvaise terre).

² BOUTAN (*loc. cit.*, p. 135).

³ GORCEIX a signalé, en plusieurs points, notamment à Salobro, l'association de la monazite et du diamant. Le corindon est, au contraire, très rare au Brésil.

⁴ BOUTAN (*loc. cit.*, p. 133).

de la décomposition de schistes et intercalée au milieu de quartzites grenus, ou d'itacolumites, dans des conditions analogues à celles du gîte de topazes de Boa Vista, près Ouro Preto. L'argile diamantifère, nettement schisteuse, contient, avec du fer oligiste et du quartz, du rutile et de l'anatase, dont la présence n'a rien que de très normal dans un schiste métamorphique. Pour Gorceix et Orville Derby, les diamants de cette mine viendraient également de filons de quartz à fer oligiste et tourmaline. Il faut ajouter, toutefois, que, ni là, ni dans un seul des points antérieurement cités, aucun minéralogiste n'a, croyons-nous, trouvé lui-même le diamant nettement encastré dans le quartz¹ : ce qui peut aisément s'expliquer par la grande rareté du minéral dans un gisement trop pauvre pour avoir été fructueusement utilisable, mais ce qui n'en laisse pas moins subsister un doute sur la valeur de ces hypothèses.

A la théorie des géologues brésiliens, qui rattachent le diamant aux filons de quartz à or, étain, titane, etc., on en a opposé une autre, d'après laquelle il viendrait de pegmatites, dans des conditions analogues à celles qu'on a cru un moment reconnaître dans l'Inde. Gorceix a objecté à cette idée le fait que le diamant ne se trouve jamais, au Brésil, dans les alluvions à pierres colorées (cymophane, triphane, andalousite, béryl, etc.), provenant du remaniement de la pegmatite et qu'on ne rencontre jamais, avec lui, de corindon.

Jamais, d'autre part, il n'a été question, jusqu'ici, au Brésil, d'un rapprochement entre le diamant et les roches basiques, qui accompagnent ce minéral en Afrique Australe.

GISEMENTS DE L'INDE²

Historique. — Les gisements de l'Inde, qui ont peut-être été exploités 3 000 ans avant notre ère, si l'on en croit les antiques traditions, ont, en tout cas, donné lieu à des exportations en Occident, dès le moment où les expéditions d'Alexandre mirent en relations fréquentes l'Asie avec l'Europe et, jusqu'au xviii^e siècle, on n'a pas connu de diamants provenant d'autre source. La valeur attribuée, encore aujourd'hui, de prime abord par les joailliers aux « diamants anciens ou de vieille roche » est une preuve de la belle qualité de ces pierres indoues. Néanmoins, après avoir fourni des richesses considérables, ces gisements n'ont plus, désormais, qu'une importance à peu près nulle. Seuls, ceux du Bundelkhand, dans

¹ On a affirmé que certains échantillons de quartz diamantifère, représentés dans des collections publiques, avaient été artificiellement préparés avec beaucoup d'habileté.

² Voir L. DE LAUNAY. *Rich. min. de l'Asie*, p. 705, avec. bibl. et spécialement : — 1881. BALL. *Economic geology of India*, p. 4 à 49. On trouvera, dans cet ouvrage, des cartes des districts diamantifères de Karnul, Golconde et Panna. — 1882. GARBE. *Die indischen Mineralien* (Leipzig). — 1884. CHAPER. *De la présence du diamant dans une pegmatite de l'Hindoustan* (C. R., t. 98, p. 113, et B. S. G. F., 1887, 3^e sér., t. 14, p. 330-345). — 1886. BOUTAN. *Le Diamant* (Chez Dunod). Contient une bibliographie antérieure. — 1889. *On the Wajra Karur diamonds and on M. Chapers's alleged discovery of diamonds in pegmatite near that place* (Mem. Geol. Sur. Ind., t. 22) (Cf. Rec., 1890, t. 23). — 1893. STELZNER. *Ueber das verm. Vork. von Diamant im hindostanischen Pegmatit* (N. J. f. Min., t. 1, p. 139 et 140). — 1906. VREDENBURG. *Geology of the State of Panna, with reference to the Diamond bearing Deposits* (Rec. India, t. 33, 261-314).

la région de Panna, donnent encore lieu à une petite exploitation, qui permet d'en observer les conditions géologiques.

Les gisements de diamants connus dans l'Inde, ne sont pas concentrés autour d'un centre unique, mais disséminés en un certain nombre de points très éloignés les uns des autres (fig. 55). C'est, d'abord, au Nord, le groupe de Panna, dont l'importance relative vient d'être signalée. Dans les provinces centrales, Wairagarh est au Sud-Est de Nagpur, près de la Godavéry. Puis vient, sur les bords de la Kistnah, le groupe fameux de Kondapalh (Madras), qui alimentait le marché de Golconde (près d'Hyderabad). Enfin, plus à l'Ouest et encore dans la présidence de Madras, on a

extrait quelques diamants à Kurnool (Karnul), Bellary (Balhari) et Cudappah (Kadapah).

En tous ces points, on a exploité uniquement des produits détritiques et sans rencontrer jamais le diamant en place comme il se présente dans la région de Kimberley : soit dans les alluvions des rivières, soit en remontant de celles-ci à l'origine directe de leur richesse, dans des conglomérats appartenant à la partie inférieure du paléozoïque. Cela rend toutes les théories que l'on peut faire sur le mode de formation réel de ce minéral très aléatoires. Nous décrirons seulement le groupe de Panna, qui a été le mieux étudié, notamment par Vredenburg.



Fig. 55. — Carte des gites diamantifères de l'Inde.

du *Bundelkhand*, à la limite Nord du grand massif primitif indou, comprend :

1° Au Nord, un massif granitique, d'où semblent provenir les diamants et, 2°, au Sud, une série sédimentaire (archéen et paléozoïque), où dominent les matériaux de destruction immédiate, tels que les grès et les conglomérats. Le granite, assez homogène, est un granite amphibolique grenu, où l'on ne signale pas de mica blanc. La série sédimentaire débute par des représentants assez rares du groupe précambrien inférieur (schistes d'Arawalli ou de Dharwar). Puis viennent les couches dites de Bijawar, surtout formées de quartzites, jaspes à hématites, pouvant arriver à constituer des minerais de fer et nombreuses couches épaisses de trapp dioritique, dont nous dirons bientôt l'intérêt possible en ce qui concerne la formation diamantifère. Ces couches de Bijawar semblent souvent s'être déposées presque horizontalement sur des gneiss érodés ; mais elles ont participé aux mouvements de la fin du précambrien, à la suite desquels

District de Panna. — Le district de Panna, situé dans l'Est

se sont stratifiés au-dessus des terrains cambro-siluriens, que l'on appelle, quand leur série est complète : à la base, série de *Cudappah* et, au sommet, série des *Vindhyan*. Cette série des *Vindhyan*, dont les deux cinquièmes au moins sont gréseux, est, à Panna, la série diamantifère. Les diamants y paraissent dans deux bancs principaux, vers la base de ce qu'on appelle les schistes de Rewa et au sommet des grès du même nom.

Les conditions sont celles d'un produit de destruction hétérogène, tel qu'il s'en forme par l'érosion immédiate fluviale ou lacustre des continents.

Si l'on étudie les galets des conglomérats diamantifères, on y voit dominer les quartz des granites, les jaspes du groupe de Bijawar, puis certains galets de quartzite vert vitreux, empruntés à la base de la formation de *Vindhyan*, auxquels les mineurs attachent une grande importance comme indice favorable pour la présence des diamants. On trouve, en même temps, toutes sortes de roches dures, et même, ce qui est assez curieux vu la friabilité de la substance, des fragments de galène.

Quelle est l'origine première des diamants? Etant donné la relation avec les quartzites verts, *Medlicott* considérait ceux-ci comme la matrice première du précieux minéral. Il semble beaucoup plus probable que le diamant, venant de quelques points situés sur le massif granitique, auprès desquels se trouvaient de tels quartzites, s'est concentré en même temps que leurs fragments, par cette circonstance accidentelle, sans qu'il faille chercher entre eux un lien d'origine. D'autre part, une note de *Chaper*, qui a soulevé de très vives discussions et au sujet de laquelle on doit faire toutes réserves¹, affirmait la présence du diamant en place dans les pegmatites d'une autre région de l'Inde, celle de *Bellary*. Par contre, un gisement situé près de Panna, à *Majgama* ou *Majgiha*, a été sommairement décrit, par le capitaine *Franklin*, comme présentant des cônes d'environ 100 m. de diamètre, remplis d'une boue verte diamantifère, avec tuf calcaire, analogues à la kimberlite qui contient les diamants du Cap.

De même, à *Wajra Karur* (Madras), dans le district d'*Anantapur*, à 16 km. Sud de la jonction des lignes Southern Mahratta et Madras Railway, *R. B. Foote* a cru trouver l'origine du diamant dans un dyke de roche basique englobant de nombreux fragments de roche encaissante et analogue, suivant lui, à la kimberlite, qui traverse le granite-gneiss à épidote. Cette hypothèse n'a pu être précisée, elle non plus. D'après *Philip Lake*, qui a repris la question en 1890, il y a, dans cette région, deux groupes de roches à plagioclase et augite, les unes antérieures au cambrien de *Cudappah*, les autres contemporaines de celui-ci. C'est à l'une ou à l'autre des deux séries qu'appartient la roche en question, basique mais non serpentineuse, et, par là, bien distincte de la kimberlite. La connexité du diamant avec elle est très douteuse.

En l'absence d'observations précises, il est certain que l'assimilation entre l'Inde et l'Afrique Australe est fort séduisante²: l'Inde présentant, à tous égards, avec l'Afrique Australe, des analogies tectoniques, bien

¹ D'après *FOOTE* (Rec. Geol. Surv. Ind., t. 19, p. 109; t. 22, p. 39) et *STELZNER* (N. J. f. Min., p. 139 et 140), *Chaper* aurait été simplement mystifié par l'introduction frauduleuse de gemmes dans un lavage opéré devant lui. Nous avons vu plus haut que l'on faisait une objection pareille à certains échantillons du Brésil.

connues et offrant notamment un développement extraordinaire d'intrusions basiques qui, déjà très abondantes dans la série archéenne de Bijawar, se sont réparties ensuite sur toute la longueur des temps géologiques, jusque dans le tertiaire¹. Il faudrait seulement que les cheminées de roches basiques, par lesquelles le diamant aurait été apporté dans l'Inde, fussent notablement plus anciennes que celles de l'Afrique Australe, puisque les premières éruptions ont donné des matériaux détritiques dès le cambrosilurien, tandis que celles de Kimberley recourent la partie déjà haute du Karoo ; et peut-être pourrait-on attribuer à cet âge plus ancien et à la destruction qui a dû en être la conséquence, la rareté ou l'absence des cheminées directement diamantifères dans l'Inde.

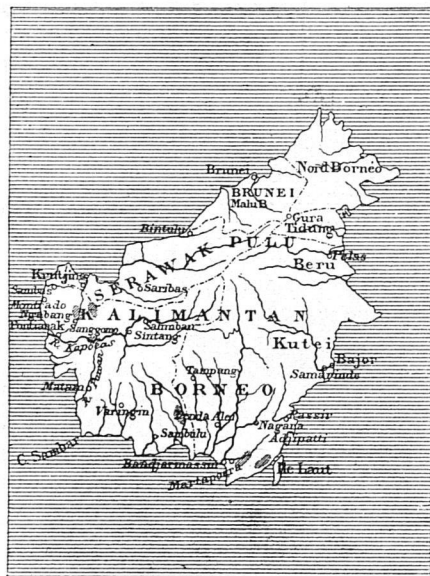


Fig. 56. — Carte des gites diamantifères de Bornéo.

GISEMENTS DE BORNÉO ET D'AUSTRALIE

Bornéo². Cette île (fig. 56) exporte annuellement, dit-on, environ 5000 k. de diamants. Il existe deux gisements principaux : l'un, à l'Ouest, dans le bassin du fleuve Kapoeas, où l'on exploite également de l'or d'alluvions ; l'autre, au Sud-Est, vers Bandjermassin. Le diamant se trouve dans des graviers ou alluvions de rivière, dans des alluvions anciennes et, peut-être, d'après Van Schelle, dans des poudingues éocènes. On a cherché un rapport problématique avec des roches serpentinisées.

New South Wales. — En Australie³, certaines alluvions diamantifères, qui n'ont encore que fort peu d'importance industrielle, ont paru concentrées au voisinage d'éruptions basaltiques, probablement pliocènes, qui les recouvrent par endroits ; les terrains du pays sont

¹ Nous avons vu, page 421, que l'on a trouvé plusieurs fois de petits diamants dans les conglomérats aurifères du Witwatersrand, qui ne sont pas très éloignés comme âge des conglomérats diamantifères de l'Inde.

² 1853. CRANFURD. *On geog. of Borneo* (J. Roy. geogr. Soc. of London). — 1875. VEERBECK. *Gis. de Bornéo* (Jaarb. van het mijnwesen im Oost Indie). — 1879. TH. POSEWITZ. *Das Diamant Vork in Borneo* (Mitt. der K. geol. Anstalt, t. 7, p. 155. Budapest). — 1901. GASQUEL. *Les gis. diam. de la région S. E. de l'île de Bornéo* (Ann. d. M., t. 20, p. 5 à 23). — 1909. BAUER. *Edelstein Kunde* (Leipzig).

³ 1879. SILLIMAN. *Diamants d'Australie* (Am. J. of Sc., t. 15). — 1886. FRIEDEL (B. S. Min., t. 9, p. 64). — 1888. LIVERSIDGE. *Diamants de la Nouvelle Galles du Sud* (Minerals of New South Wales). — 1896-1897. MILNE CURRAN (J. Proc. Roy. N. S. W., t. 30, p. 214). — 1898 (Z. f. pr. G., 403). — 1899. PORTER. *Diamants à Inverell* (N. S. Wales) (C. R. Z. f. p. G., p. 18). — 1906. EDGEWORTH DAVID, *Occur. of diamonds in matrix*

généralement carbonifères ou dévoniens. On cite spécialement les gîtes de Mudgee et de Bingera, dans le New South Wales du Sud (vers 32° de latitude Sud) et des trouvailles isolées, près de Bathurst, ainsi que dans le Queensland.

A Oakey Creek, près Inverell, en New South Wales, on a rencontré des dykes diamantifères contenant le diamant en place dans un tunnel à travers le granite, destiné à aller rechercher des alluvions diamantifères et stannifères. Ces dykes étaient formés de diabase à hornblende, dont le plus large avait 8 m. de large. On les suppose mésozoïques, tandis que le granite est probablement permien, ayant métamorphisé des couches carbonifères. Depuis 1867, le New South Wales a pu produire 162 000 k. valant 2,5 millions de francs.

GISEMENTS DE L'OURAL ET DU CHANTOUNG¹

Les produits du lavage des alluvions aurifères ont, en divers pays du monde, donné lieu à quelques découvertes de diamants : ce qui tient sans doute uniquement au cube considérable de matériaux ayant déjà subi une préparation mécanique naturelle, qui se trouvent ainsi passés en revue.

On peut citer, dans l'Oural, la région de Krestovozdvichensk, sur la rivière Poloudenka, vers le 59° degré. Au total, on signale 220 diamants trouvés depuis 1829 en divers points de l'Oural (Bissersk, Ouspenkoi, Katchkar, etc.). En Sibérie, deux diamants ont été rencontrés dans les laveries d'or de l'Iénisséi.

De même, dans le Chantoung (région d'Itchoufou), les Chinois recueillent, depuis longtemps, des diamants de mauvaise qualité.

DIAMANTS DE L'AMÉRIQUE DU NORD. FER NATIF DE L'ARIZONA¹. MÉTÉORITES

A diverses reprises, on a trouvé des diamants isolés dans l'Amérique du Nord. Suivant une remarque précédente, les alluvions aurifères se prêtent tout particulièrement à ces rencontres. Des diamants y ont été recueillis dans la North Carolina, puis dans le Wisconsin, à Plume creek, comté de Pierre², dans le Michigan, la Virginie, la Californie, etc. Les diamants de l'Arkansas semblent présenter plus d'intérêt théorique et peut-être même pratique.

On avait rencontré, à diverses reprises, dans ce pays, des diamants isolés quand une découverte, faite en 1907, attira l'attention. Dans un gisement nouveau, situé près de Nashville, à 90 km. de Little Rock, le dia-

at Pipe, etc. New South Wales (Cong. Mexico, 1201). — 1909. J. ALLAN THOMSEN. *The diamond matrices of Australia* (Géol. Magaz., t. 6).

¹ Voir L. DE LAUNAY. *Richesses minérales de l'Asie*, p. 145, 575, 767. — Cf. 1830. ENGELHARDT. *Die Lagerstätte der Diamanten im Ural Geb.* — 1831. GOEBEL. *Ueber das Vork. der Diamanten im Ural* (Schweiger Journ., t. 61). — 1838. PARROT. *Notice sur les Diamants de l'Oural* (Mém. Ac. I. des Sc. de Saint-Petersbourg, 6^e série, t. I, p. 21). — 1870. KOSCHAROW. *Diamants de l'Oural* (Mater. zur Min. Russlands.). — 1879. CHAPER. *Sur quelques faits observés dans le massif de l'Oural* (B. S. G. F., t. 8). — 1899 (Z. f. pr. G., p. 28).

² 1890. *Mineral Resources*, p. 443.

mant se trouve, en effet, au milieu d'une roche qui serait, d'après le Dr Kunz, une péridotite analogue à celle du Cap. A la fin de 1909, on avait déjà extrait un millier de diamants pesant au total 500 k. Plusieurs compagnies se sont formées pour organiser un traitement industriel.

Le fer natif de *Cañon Diabolo* (Arizona), pris d'abord pour une météorite, puis étudié par Mallard, Friedel et Moissan en 1892-93, est formé, d'après eux, en majeure partie, de fer (91 à 95 p. 100 suivant les points) et de nickel (3 à 5 p. 100), avec un peu de silicium et de phosphore et des nodules riches en sulfure de fer; il renferme du diamant transparent, du diamant noir ou carbone, du graphite et un charbon marron d'une densité assez faible. Il s'agit là d'une série de blocs, disséminés autour d'un cratère de 1 200 m. de diamètre et 180 m. de profondeur (120 m. au-dessus de la plaine environnante, plus 60 m. de saillie du bord extérieur): cratère recoupant, paraît-il, des couches de calcaire, uniformément relevées vers le centre et que l'on attribue aujourd'hui à une explosion de gaz interne, analogue à celles qui auraient ouvert les cheminées diamantifères de Kimberley ¹.

Comme véritable météorite, celle de *Novo-Urey*, Krasnoslobodsk, gouvernement de Penza (Russie), renferme, d'après Jerofeief et Latchinof, du diamant noir et peut ainsi être rapprochée du fer natif de l'Arizona ².

On a également signalé le diamant des météorites d'*Arva* ³, de *Carcote* (Chili), etc., l'existence du diamant dans l'acier, etc. ⁴...

GISEMENTS DIAMANTIFÈRES DIVERS ⁵

Des diamants, généralement sans valeur, ont été encore signalés dans des pays divers : en Europe, dans les sables grenatifères de *Bohême* et en *Irlande*; en Amérique du Sud, dans les alluvions aurifères de la *Guyane*.

On arrive, en ce dernier point, à une véritable production : 4 968 k. en 1908, 5 646 k. en 1909. Ces exploitations ont commencé, depuis 1900, sur le Putareng Creek, affluent du Mazaruni, On a trouvé aussi des diamants sur le Curibrong, près de son confluent avec le Potaro.

¹ 1871. BURKART. *Diamants de la Californie* (Jahresb., p. 1130). — 1879. SILLIMAN. *Gisements diamantifères de l'Amérique du Nord* (Am. J. of Sc., t. 8). — 1888. KÜNTZ. *Diamants de la Caroline du Nord* (Chem. Centr. Bl., p. 415). — 1890. U. S. *Mineral Resources*, p. 445. — 1892. MALLARD. *Diamants dans le fer natif de l'Arizona* (C. R., 4 avril 1892). Cf. FRIEDEL (B. S. Min., 1892, t. 15, p. 258). — 1892-93. KÜNTZ. *Diamants de la Virginie et du Wisconsin* (Chem. Cent. Blatt, 1892, p. 915; 1893, p. 900). — 1893. MOISSAN. *Fer natif de l'Arizona* (C. R., t. 116, p. 288). — TURNER. *The occurrence and origin of diamonds in California* (Am. geol., t. 22, n° 3, 182-191). — 1899. HOBBS. *The Diamond fields of the great Lakes* (Journ. of geology, Chicago, mai, t. 7, p. 375-385; cf. Z. f. pr. G., 1900, p. 187). — 1907. *Les Diamants de l'Arkansas* (La Nature, suppl. du 28 sept.). — U. S. *Mineral Resources for 1906, 1907, 1908, 1909*. — *Ann. Rep. Geol. Surv. Arkansas*.

² 1888. Russ. min. Ges, t. 24, p. 272.

³ MOISSAN. *Chimie minérale*, t. 2, p. 192, avec bibl.

⁴ Voir plus loin p. 439.

⁵ 1870. KREJCI. *Diamanten in Böhmen* (K. K. geol. R. A., et N. J. Min.). — 1870. SCHAFARITZ. *Découverte du diamant en Bohême* (C. R., t. 70). — 1886. BALL. *Discovery of a diamond in Ireland in the year 1886* (Sc. Proc. Dublin Soc. t. 5, p. 332). — 1901-1902. *Diamants à la Guyane anglaise* (Z. f. pr. G., 1901, t. 39; 1902, p. 201. 317).

RÉSUMÉ SUR L'ORIGINE ET LA REPRODUCTION DU DIAMANT

Nous commencerons par résumer ce que l'on doit retenir des descriptions précédentes sur l'origine du diamant. Nous verrons ensuite ce que les tentatives faites pour le reproduire artificiellement nous apprennent de plus.

Conditions de gisement. — Quelles que soient les conditions de production naturelles du diamant, on est en droit d'affirmer que ces conditions ont été très rarement réalisées. Bien que le diamant brut n'attire pas l'attention autant qu'on pourrait le croire, son éclat est néanmoins assez spécial et sa très grande valeur invite assez à examiner les cas douteux où l'on a pu supposer sa rencontre pour que bien peu de gisements diamantifères aient dû échapper à l'attention dans les pays dont l'exploration est un peu avancée. Il faut ajouter que sa dureté amène nécessairement sa concentration (souvent très loin de son origine) dans les produits d'alluvions, dont beaucoup ont été examinés avec un soin extrême pour y chercher d'autres substances : l'or, le platine, l'étain, le rubis et le saphir, les grenats, etc. Dans tous les pays où il existe de semblables exploitations, la moindre trace de diamant a dû se trouver reconnue ; et il ne faut pas, à notre avis, tirer d'autre conclusion de l'association signalée en tant de pays entre le diamant et l'or (Californie, Wisconsin, Sibérie, Oural, Witwatersrand, Bornéo, Guyane, etc.), ou, ailleurs, entre le diamant et le grenat (Bohême). L'enseignement à tirer des gisements alluvionnaires est donc très restreint et l'on peut seulement en retenir le fait que le diamant a cristallisé accidentellement dans les provinces métallogéniques en question. Il vaut mieux se borner aux cas, relativement très rares, où la venue diamantifère se présente dans des conditions géologiques nettement déterminées.

Parmi ces cas, le plus net et de beaucoup le plus important est celui de l'Afrique Australe qui, en deux mots, se résume ainsi : dans une plateforme primitive, cheminées éruptives de péridotite à pyroxène, serpentinisée jusqu'à plus de 800 m. de profondeur, renfermant le diamant associé au graphite, au grenat et aux minéraux constituants de la roche. Ces conditions semblent, en somme, fréquentes dans l'Afrique du Sud ou la Rhodésie, et se rencontrent aussi dans le New South Wales, l'Arkansas, peut-être l'Inde, etc. ; mais c'est, en général, seulement à titre minéralogique : les cheminées, où la teneur en diamants a atteint la proportion utilisable de 1 ou 2 gr. au mètre cube étant, au contraire, tout à fait exceptionnelles. En ces cheminées mêmes, nous avons vu que la teneur et la qualité se modifiaient très sensiblement d'un point à l'autre d'une même cheminée, soit en section horizontale, soit en coupe verticale, et encore plus d'une mine à la mine voisine. Il s'agit donc d'un cas de cristallisation très délicat et très sensible aux variations de circonstances extérieures.

Ces conditions, réalisées en grand dans l'Afrique Australe, où nous les avons suffisamment étudiées plus haut, ont-elles été ailleurs l'origine normale du diamant ? On a naturellement examiné cette hypothèse avec un

soin tout particulier. D'après les descriptions, il semble, comme nous venons de le rappeler, que l'on puisse citer un cas analogue en New South Wales, un dans l'Arkansas, un autre également dans l'Inde. L'Inde, qui est tout à fait homologue à l'Afrique Australe comme province métallogénique, se présentait tout naturellement à notre esprit comme la première région, où l'on devait espérer trouver quelque chose de comparable. Néanmoins, un cas unique et discutable de kimberlite diamantifère ne saurait être généralisé et l'on ne peut rien conclure de précis au sujet de ce continent, autrefois si riche en diamants. Parmi les autres plates-formes primitives, la Sibérie et le Chantoung n'ont donné que de très rares diamants alluvionnaires, qui ne peuvent rien nous apprendre. Dans l'Oural, on a seulement noté que les serpentines sont abondantes près des points où se rencontre le diamant. Tous ces cas sont donc plutôt en faveur d'une cristallisation profonde et sous pression en magma basique.

Un cas important, et qui semble se présenter tout différemment, est celui du Brésil, où l'on affirme que le diamant est en place dans des veines de quartz filoniennes traversant des grès quartzites et conglomérats. En admettant même que les observateurs n'aient pas été victimes de quelque supercherie, on peut toujours se demander si le diamant n'appartient pas là, en réalité, aux matériaux détritiques des terrains que ces veines quartzieuses traversent; et nous devons dire que l'assimilation tectonique du Brésil avec les régions précédemment considérées nous inclinerait volontiers vers quelque hypothèse semblable. Cependant, jusqu'à nouvel ordre, on doit admettre comme exacte la théorie adoptée par les géologues du Brésil. On serait donc là en présence d'un mode de formation tout différent, en milieu acide, peut-être explicable par cette intervention des fluorures de carbone, à laquelle Moissan avait songé au début de ses expériences de reproduction. Les inclusions de topaze, rutile, orpyrite, etc., que l'on rencontre dans certains diamants, seraient en faveur de cette idée.

Sur l'âge des formations diamantifères, qui pourrait contribuer à nous éclairer, nos notions sont très vagues. Au Brésil, la formation est antérieure aux quartzites micacés huroniens, dans lesquels on trouve le diamant; aux Indes, pour la même raison, aux conglomérats siluriens.

Dans l'Afrique Australe, le diamant est, au contraire, d'âge au moins triasique. Enfin, les vagues renseignements que l'on possède sur l'Australie et sur Bornéo tendraient à faire supposer un lien, dans le premier cas, avec des basaltes pliocènes; dans le second, avec des poudingues éocènes. L'hypothèse la plus vraisemblable est donc celle de récurrences ayant réalisé les mêmes phénomènes à diverses époques dans des conditions tectoniques semblables.

Reproduction du diamant¹. — Le problème de la reproduction du dia-

¹ 1835. BERTHELOT. *Sur les états du carbone* (Ann. Ch. et Ph., 4^e série, t. 19). — 1880. HANNAY. *Art. form. of the diamond* (Proc. Roy. Soc., t. 30). — 20 janv. 1890. BERTHELOT. *Les carbones graphitiques* (C. R.). — 1894. HUNTINGTON. *Sur le diamant des météorites* (Proc. Am. Sc. of Arts, t. 21, p. 204-211). — 1897. LEWIS. *On the genesis and matrix of the Diamond* (Bonney, Longmans). — 1899. *Diamants artificiels*

mant se pose dans des conditions si particulièrement engageantes, promettant à la fois la gloire et la fortune à celui qui le réalisera, la solution en semble tout d'abord si simple que les tentatives à cet égard ont été innombrables. On a essayé, pour faire cristalliser le carbone, les forces calorifiques les plus puissantes dont nous disposions. Le résultat presque entièrement négatif de ces recherches est quelque peu décourageant¹. De toutes les tentatives faites, une seule, qui elle-même a été très discutée, mais que l'on peut, néanmoins, croyons-nous, probablement retenir comme ayant réussi, celle de Moissan, en 1893, a donné de petits diamants microscopiques, sans que jamais l'auteur ait pu augmenter la dimension de ses produits².

La propriété toute spéciale du diamant, à laquelle on doit, semble-t-il, songer d'abord, est sa forte densité. Bien qu'on ait exagéré le nombre des variétés de carbone et que les graphites, en particulier, présentent, d'après les derniers travaux de H. Le Chatelier, une densité unique de 2,255³, il existe néanmoins au minimum trois variétés allotropiques témoignant d'une condensation progressive, dont le diamant constitue le cas extrême, avec des densités de 1,8, 2,25 et 3,51. Il était donc logique de chercher à obtenir le diamant par une condensation du carbone, supérieure à celle qui donne si aisément du graphite et réalisée par exemple à plus haute température.

Mais, lorsqu'on se borne à augmenter la température sans accroître la pression, on n'obtient jamais que du graphite et point de diamant. Moissan, qui disposait, dans son four électrique, de températures pouvant atteindre près de 3500°, a essayé de dissoudre du charbon de sucre dans l'argent, le fer, l'aluminium, le glucinium, le chrome et de le faire cristalliser par un abaissement de température. Le carbone, ainsi mis en liberté, a toujours pris la forme de graphite.

D'ailleurs, comme l'a montré Jacquelin dès 1847, le diamant se transforme en graphite lorsqu'on le porte à la température de l'arc électrique. c'est-à-dire qu'à très haute température, la forme stable du carbone est, non pas le diamant, mais le graphite.

En fait, dans les conditions naturelles, le graphite se trouve ordinairement dans des roches acides, dont la température de cristallisation était élevée, le diamant dans des roches ultra-basiques où cette température pouvait être beaucoup plus basse.

(Z. f. pr. G., p. 189). — 1902. GELLENDIEN. *Vers. von Dr Ludwig zur Erzeugung künstl. Diam.* (Vortz z. d. V. deutsch. Ing., p. 1709-1711). — 1904. MOISSAN. *Chimie minérale*, t. 2, p. 200 à 206 avec bibl. — 1908. L. DE LAUNAY. *La synthèse du diamant* (La Nature. 25 janv., n° 1809). — 1909. LE CHATELIER et WOLOGDINE. *Sur les états du carbone* (C. R., 28 juin).

¹ Friedländer de Berlin prétend avoir obtenu du diamant en introduisant du graphite dans le produit de fusion de l'olivine. Le diamant aurait donc cristallisé là dans des silicates. On s'est demandé, comme nous l'avons dit page 418, si les diamants, dans les roches sud-africaines, ne seraient pas des produits d'emprunt. Certains caractères semblent montrer qu'ils ont été tout au moins transportés après cristallisation comme les quartz des porphyres quartzifères.

² L'expérience a été répétée par CROOKES (Proc. Roy. Inst., 1894), MAJORANE (Atti Ac. Lincei, 1896), LUDWIG (Chem. Zeit., t. 15, 979, 1901). On lui a toujours objecté la présence d'une certaine quantité de silicium. Voir MOISSAN, *Chimie minérale*, t. 2, p. 206.

³ Voir LE CHATELIER. *Le carbone* (Dunod, 1908 et C. R., 28 juin 1909).

Cela semble correspondre, ainsi que l'a montré Moissan, à ce fait que le carbone, chauffé à la pression ordinaire, passe directement de l'état solide à l'état gazeux ; au contraire, pour l'amener à donner du diamant, il paraît nécessaire de déterminer, par l'intervention d'une forte pression, son passage à l'état liquide et d'obtenir ainsi sa cristallisation à basse température. Les diamants naturels, de dimensions microscopiques, présentent, en effet, souvent des formes en gouttes ou en boules arrondies (reproduites dans les expériences synthétiques) et qui ne sont guère explicables que par une fusion antérieure, tandis qu'en chauffant du carbone dans les arcs les plus puissants, où on arrive à le volatiliser et à en faire du graphite par condensation, jamais on n'aperçoit le moindre indice de fusion.

Dans les expériences synthétiques de Moissan, la forte pression, qui devait amener le carbone à l'état liquide et sa cristallisation en diamant, a été obtenue en utilisant le brusque changement de volume, qui se produit, dans le dissolvant même du carbone, la fonte, au moment où celle-ci se solidifie : la fonte partageant la propriété de l'eau d'augmenter de volume en se congelant. La compression, qui en résulte pour cette fonte emprisonnée dans un creuset, amène la condensation polymérique du carbone, passant de la densité 2,2 à celle 3,5 et, en même temps, il cristallise des diamants¹.

Pour réaliser le phénomène, Moissan a commencé par fondre, au four électrique, environ 200 gr. de fer doux, dans lesquels il avait dissous, à saturation, du charbon de sucre et il a déterminé le refroidissement brusque en portant le creuset, soit dans l'eau, soit dans de la limaille de fer, du plomb fondu, etc., ou encore en grenillant la fonte dans un bain de mercure. En attaquant ensuite par l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique, l'acide fluorhydrique et détruisant le graphite par le chlorate de potasse et l'acide azotique fumant, il a isolé une série de diamants, présentant, paraît-il, tous les caractères des diamants naturels, jusqu'à l'éclatement spontané dans quelques cas, ou aux cupules donnant un aspect chagriné à la surface, aux *crapauds* (inclusions noires de carbone), produits surtout dans le refroidissement par la limaille de fer.

Cette cristallisation du diamant dans un bain métallique correspond avec les observations géologiques résumées plus haut sur les gisements du Cap, de l'Arkansas, du New South Wales, etc., ainsi qu'avec les remarques faites, à diverses reprises, sur la présence du diamant dans certains fers natifs, certaines météorites, ou même dans des fontes industrielles et des aciers², quoique cette dernière observation ait été contestée par Moissan³ après avoir été annoncée à diverses reprises, notamment par Rossel et Franck.

¹ On s'est demandé si les diamants de Moissan n'étaient pas des carbures de silicium très carburés (1903. COMBES, dans le *Moniteur de Quesneville*). Leur assimilation avec le diamant semble, en définitive, probable, bien qu'elle n'ait été formellement constatée par aucun minéralogiste. On doit, d'ailleurs, remarquer que le diamant lui-même renferme toujours du silicium, dont le rôle, plus important peut-être qu'on ne le croit, n'a jamais été bien précisé. Charpy, en faisant refroidir de la fonte en fusion sous une pression de 10.000 atmosphères, n'a obtenu que du graphite.

² MOISSAN. *Chimie minérale*, II, 192 avec bibli.

³ *Ibid.*, p. 206.

Dans tous ces cas, la cristallisation du carbone en milieu basique, par brusque surpression exercée sur du carbone en dissolution, peut être regardée comme vraisemblable : soit que ce carbone ait préexisté dans le bain de fonte, soit qu'il s'y soit d'abord produit par décomposition du carbure d'hydrogène, dont la présence paraît avoir été fréquente dans les réactions de profondeur¹.

Cependant, ainsi que nous l'avons indiqué plus haut à propos du Brésil, certaines constatations relatives à ce pays pourraient faire penser, d'autre part, à une cristallisation toute différente du carbone dans le milieu acide, où se sont produites les pegmatites, ou les quartz avec topaze².

C. — COMPOSÉS HYDROCARBURÉS

Nous réunissons, dans ce groupe, un certain nombre de substances minérales, très diverses par leur aspect comme par leurs applications, dont la composition élémentaire implique essentiellement l'association ternaire du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène, en proportions variables, avec, accessoirement, de l'azote et du soufre. Chacune d'elles n'est pas un composé défini, mais un mélange de plusieurs corps, parfois mal connus, qui amènent, suivant la prépondérance de l'un ou de l'autre, des propriétés variables. Les corps essentiels paraissent être des hydrocarbures, ainsi qu'on a pu le montrer pour les huiles minérales, dont l'étude scientifique est plus avancée. L'oxygène semble intervenir en grande partie à l'état d'eau de combinaison.

L'azote et le soufre sont, d'autre part, dans bien des cas, des éléments adventifs. Cependant il existe également des composés organiques, où entrent cet azote et ce soufre comme éléments actifs. Le tout produit des séries continues de corps très nombreux, dont la classification théorique reste à faire : séries, dont les principales comprennent les combustibles minéraux, les huiles minérales, les gaz naturels combustibles et les bitumes. L'étude complète des combustibles est, comme nous l'avons dit, laissée de côté dans cet ouvrage, et nous n'en retiendrons, à titre de mention sommaire, que des corps à applications spéciales comme le jais, le boghead, etc.; néanmoins il est utile, dans ce préambule consacré aux généralités, de montrer quelle place devrait leur être réservée, et d'indiquer les grandes lignes de leur étude physique. C'est pourquoi nous les avons fait intervenir dans le tableau 18, où les hydrocarbures

¹ Dans un mémoire aux Annales de chimie et de physique (nov. 1896), Moissan a insisté sur la facile formation des carbures à haute température et, par suite, l'abondance avec laquelle ces composés avaient dû se produire aux époques anciennes du globe, dans des bains de fonte internes, à la scorification desquels on attribue les roches éruptives. Il a montré, notamment, comment avaient dû se produire ces carbures métalliques, dégageant, par l'action de l'eau, des carbures d'hydrogène, qui pourraient être l'origine première du pétrole (carbures des métaux alcalino-terreux donnant de l'acétylène; carbures d'aluminium, donnant du formène, etc.).

² Avec beaucoup d'imagination, on s'est demandé si, dans ce cas, le carbone cristallisé ne serait pas une transmutation du silicium.

solides et liquides ont été divisés en trois groupes principaux (les gaz naturels étant laissés de côté) : les combustibles solides, les huiles minérales et les produits bitumineux.

Dans chaque groupe, la classification est surtout fondée sur les caractères physiques, tels que pouvoir calorifique, température d'inflammation, longueur des flammes, pouvoir agglomérant pour les houilles, pouvoir éclairant, capillarité, densité pour les huiles, etc. Nous en dirons bientôt quelques mots ; mais il faut voir auparavant quelle classification géologique on peut proposer.

Géologiquement, un très grand nombre de ces composés hydrocarbonés, et, pour certains savants, la totalité procèdent directement de l'activité organique. Le fait est universellement admis pour les combustibles minéraux, sauf à faire, dans certaines hypothèses, intervenir un agglutinant bitumineux d'origine interne. Le jais et l'ambre, dont nous dirons deux mots en raison de leurs usages spéciaux, sont dans le même cas. La même origine n'est guère contestable non plus pour les schistes bitumineux, sauf une restriction analogue.

Ces schistes bitumineux (naphto-schistes), qui constituent des couches régulièrement stratifiées, se relie, en effet, aux houilles, par toute une série de transitions, telles que les lignites bitumineux, les bogheads, les cannelcoals, fréquemment associés à eux dans les mêmes étages.

À l'autre pôle, nous savons, d'autre part, que les manifestations hydrocarbonées sont un fait constant dans les phénomènes volcaniques, et l'on est en droit, comme nous l'avons vu à propos du diamant et du graphite, d'attribuer à ces hydrocarbures profonds, plus ou moins brûlés en acide carbonique, un rôle dans la cristallisation de certaines roches ou filons. Il est, dès lors, difficile d'être entièrement affirmatif en ce qui concerne l'origine organisée des pétroles et de diverses substances que nous allons rattacher à ceux-ci, par une remise en mouvement ascensionnelle, comme les bitumes, sables bitumineux, ozocérites et asphaltes. Ce n'est pas, croyons-nous, par la chimie, à laquelle on a généralement demandé la solution d'un problème avant tout géologique, que l'on arrivera à résoudre celui-ci. Chimiquement, comme nous le verrons, les deux modes de formation sont également possibles. Cependant nous penchons plutôt pour la théorie organique, en l'entendant, il est vrai, autrement qu'on ne le fait d'habitude, c'est-à-dire en admettant que tous ces corps ont subi un déplacement ordinaire depuis leur dépôt, qui correspond à des phases géologiques terminées ; en sorte que la plupart de leurs gisements actuels ne sont pas assimilables à des sédiments formés sur place, mais bien plutôt, dans leur manifestation dernière, à des imprégnations latérales dérivant de venues filoniennes. Les sables et vases pétrolifères seraient alors, sous leur forme primitive, assimilables aux schistes bitumineux et, par l'intermédiaire de ceux-ci, à rapprocher des houilles, tandis que leurs manifestations secondaires, leurs remises en mouvement auraient seules pris une apparence de filon ou d'imprégnation latérale.

Notre classification, dont nous reconnaissons volontiers le caractère empirique, commencera donc (I) par les combustibles minéraux et les substances associées, telles que le jais et l'ambre. Elle se continuera par les corps intermédiaires entre la houille et les schistes bitumineux

(naphto-schistes), comme les bogheads et cannelcoals, ou charbons bitumineux à gaz très éclairant. Puis viendront (II) les naphto-schistes. Après quoi, nous étudierons (III) le groupe des huiles minérales, auxquelles nous rattacherons directement, comme produits d'altération, les ozocérites, bitumes et asphaltes. Cette dernière assimilation est fondée sur des rapprochements constants, qui peuvent avoir quelque intérêt en ce qui concerne les gites pétrolifères, mais qui, à peu près certains pour les ozocérites et bitumes, deviennent discutables pour les asphaltes, à propos desquels une origine éruptive, que nous croyons devoir rejeter, serait à la rigueur soutenable. Enfin, nous dirons quelques mots (IV) des gaz naturels, qui doivent être considérés, eux aussi, comme un cas particulier et un dérivé des venues pétrolifères.

I. — COMBUSTIBLES MINÉRAUX, JAIS ET AMBRE ¹

1° CLASSIFICATION DES COMBUSTIBLES MINÉRAUX

Nous nous bornerons, en ce qui concerne les combustibles minéraux, à une simple classification, qui nous sera utile bientôt pour nous fournir des éléments de comparaison.

Nous avons déjà fait remarquer qu'un combustible théorique était un mélange, en proportions variables, de plusieurs composés hydrocarbonés définis, dont l'un doit être fusible à basse température et communiquer le pouvoir agglutinant, tandis qu'un autre est très volatil, un troisième donne les qualités bitumineuses, etc. Il faut ajouter que, dans un combustible pratique, interviennent, en outre, toujours plus ou moins de parcelles schisteuses donnant les cendres. On ne doit jamais oublier, dans les raisonnements, que l'on a toutes les transitions d'une houille pure à une houille de plus en plus cendreuse, à un schiste à peine chargé de matières carburées et enfin à un schiste absolument stérile.

Géologiquement, la houille, surtout quand on l'examine sur des échantillons d'âge relativement récent, apparaît formée, tantôt par des écorces ou des feuilles de *Cordaites*, *Calamodendron*, etc., tantôt par des troncs à peine déformés de fougères arborescentes. Les lignites contiennent beaucoup de feuilles de graminées et de mousse, avec des aiguilles de conifères, des grains de pollen, des diatomées, etc. En moyenne, plus un combustible est ancien, plus il s'est enrichi en carbone par élimination des matières volatiles et plus, en même temps, s'y sont effacées les traces de sa structure organisée.

Cette relation entre la nature d'un combustible et son âge provient, avant tout, d'un métamorphisme ayant son origine dynamique dans les

¹ On peut consulter, entre autres : 1889. PH. NARCY. *Les Bitumes*, 442 p. in-8°. Lille. Lefebvre-Ducrocq. — 1897. FERD. FISCHER. *Die chemische Technologie der Braunstoffe* (Braunschweig, Vieweg). — 1903. P. MAHLER. *Etudes sur les combustibles* (96 p. in-8°. Paris, Béranger). — 1906. L. BABU. *Traité de métallurgie générale* (t. II. Combustible. Paris, Béranger). — 1907. J. CLAUDEL. *Formules, tables et enseignements usuels* (2 vol., Dunod). — 1908. LE CHATELIER. *Le carbone* (Paris, Dunod).

TABLEAU 18. — TABLEAU DES COMBUSTIBLES MINÉRAUX SÈCHÉS ET PRIVÉS DE CENDRES

COMBUSTIBLES MINÉRAUX	DENSITÉ	C p. 100	H p. 100	O p. 100	Az p. 100	S. p. 100	POUVOIR calorique par kg.	MATIÈRES volatiles p. 100.	TEMPÉRATURE d'incandescence.	EMPLOIS
I. — Combustibles solides.										
Tourbe	300 à 900	50 à 60	6,50	29 à 35	1,50		3.000		250°	
Lignite	1.200	70 à 75	5,5	13 à 23	0,50 à 2	2,50 à 3	6.000	50	800°	Charbon flambant à coke non aggloméré. Charbon à gaz très éclairant. Charbon à vapeur (coke à peine fritté).
Cannel coal	1.200	80 à 85	7 à 8	9	1	3	8.200	40 à 60		
Houille maigre à longue flamme (houille sèche, splint coal)	1.200 à 1.250	80 à 84	5,5	11 à 9	1	0	8.200	35 à 40		
Houille grasse à longue flamme (houille à gaz, gaz coal) et houille grasse proprement dite ou maréchal (smithy coal)	1.200 à 1.250	84 à 88	5	9 à 8	1	à	8.600	30 à 35		
Houille grasse à courte flamme (houille collante, caking coal)	1.280 à 1.320	86 à 90	5 à 4,5	6 à 4,5	1	1	8.700	16 à 23		
Houille maigre à courte flamme	1.350 à 1.400	90 à 93	4,5 à 3,5	5 à 4	0,50	1	8.600	6 à 14		
Anthracite	1.400	95	2	2,50	0,50		8.200	3		Charbon à poêle (coke à peine fritté). (Coke non aggloméré).
Carbone amorphe	1.800	100					8.137		700°	
Graphite	2.250	100					7.910			
II. — Combustibles liquides.										
Huile légère de Pennsylvanie	816	82	14,8	3,2			9.910		800°	Huile légère d'éclairage. Huiles à graisser.
Huile lourde de Virginie	873	83,5	13,3	3,2			10.180			
— Ohio	887	84,2	13,1	2,7		de 0,50 à 2 (1)	10.339			
— Alsace	892	85,7	12,0	2,3			10.100			
— Bakou	884	86,3	12,3	1,1			11.400			
Mazout du Caucase	910	87,1	11,7	1,2			10.800			Combustible visqueux, résidu de pétrole.
III. — Produits bitumineux.										
Naphto-schiste de la Nouvelle-Galles (contenant 10 à 12 p. 100 de schistes)	2.000	74,6	10,5	3,90			9.246		800°	Charbon à gaz très éclairant. Cire minérale.
Schistes bitumineux d'Autun	1.250									
Boghead d'Autun	1.180	75 à 82	11	6	1	0,40		55 à 60		
Ozocérite de Boryslav	953	85,75	15,15				10.946			
Bitume de Pechelbronn	1.000 à 1.300	86,6	10 à 12	0,3 à 2,80	0,30 à 1	1,40				

1. Le soufre a été rarement dosé dans les pétroles. Ceux du Canada en contiennent environ 0,50 p. 100. Ceux de la Californie arrivent à 2 p. 100 à Santa-Barbara.

plissements subis et non d'une évolution qui se serait produite avec le temps dans les conditions du dépôt originel.

On a souvent l'occasion de constater une relation possible entre la nature plus ou moins carburée des combustibles et les mouvements orogéniques. Par exemple, le grand bassin houiller des Appalaches, aux Etats-Unis, commence à l'Ouest par des houilles bitumeuses dans des terrains à peine ondulés, tandis qu'à l'Est les couches soumises à des plissements internes sont devenues de l'antracite. Un phénomène analogue existe en Belgique. Cependant il y a lieu de remarquer que, pour J.-J. Stevenson, cette différence serait due, non au plissement mais à la plus grande épaisseur originelle du terrain houiller dans la région anthracifère et l'on a soutenu la même thèse pour le bassin belge ¹.

Nous commencerons par un tableau d'ensemble donnant la composition élémentaire et divers autres éléments de comparaison, rapportés autant que possible à des types moyens, mais supposés exempts de cendres et asséchés.

Notre tableau 18 comprend trois groupes distincts. On y trouve d'abord les combustibles solides classés dans l'ordre de leur teneur en carbone, qui correspond à l'ordre croissant de leurs densités, à l'ordre décroissant de leur teneur en matières volatiles. La tourbe, le carbone amorphe et le graphite y ont été ajoutés comme termes extrêmes, montrant les deux aboutissements de la série.

Puis viennent, également dans l'ordre de leurs teneurs en carbone, les combustibles liquides, utilisés d'ordinaire sous leur forme immédiate : les plus légers comme huile d'éclairage, les suivants comme huile à graisser. On remarquera que la colonne des pouvoirs calorifiques montre ces combustibles liquides continuant, avec un pouvoir calorifique de plus en plus grand, les combustibles solides précédents.

Enfin, dans un troisième groupe, il a paru utile de réunir, en les plaçant dans le même ordre, quelques substances hydro-carburées analogues, ayant d'autres emplois, comme les naphto-schistes dont on extrait de l'huile lampante, les cannelcoals et bogheads, sortes de lignites bitumineux employés pour faire du gaz d'éclairage très éclairant, l'ozocérite (ou cire minérale) et les bitumes. L'emploi que nous indiquons pour chaque corps est celui qu'il peut recevoir immédiatement à l'état brut. Mais chacun d'eux est, on le sait, susceptible de donner par distillation une série de produits, dont il suffit de rappeler l'existence ².

La composition chimique réelle des houilles, c'est-à-dire la proportion et la nature des corps constituants, n'est pas connue. On sait seulement quelle en est la composition élémentaire, sans savoir comment se groupent entre eux ces éléments. Tous les corps classés ici nous apparaissent ainsi comme des mélanges de carbures d'hydrogène hydratés (ou oxygénés), dans la composition desquels l'azote, en proportion dépassant rarement 1 p. 100, paraît intervenir surtout comme un élément adventif emprunté

¹ 1893. *Origin of the Pennsylvania Anthracite* (Bul. geol. Soc. of Am. c. 5, p. 39-70, carte).

² Le lignite se sépare de la houille et se rapproche du bois, en ce qu'il donne un peu d'acide acétique à la distillation.

à l'air¹, quoiqu'on ait isolé dans les pétroles des bases azotées de type C^mH^mAz . Le soufre, dans les houilles, provient surtout de traces pyriteuses ou de sulfate de chaux également adventives, un peu aussi de soufre organique. Dans les lignites, où le soufre atteint 3 p. 100, il intervient, au contraire, comme élément constituant de la substance organique. Il en est de même dans les cannelcoals et dans toute une série de bitumes. Le soufre abonde dans les pétroles lourds de Californie.

En nous bornant aux trois éléments principaux (carbone, hydrogène, oxygène), si nous envisageons d'abord les combustibles solides, on voit que la teneur en carbone part de 50 p. 100 dans les tourbes, ou (si l'on veut se borner aux combustibles des étages géologiques plus anciens), de 70 p. 100 dans les lignites, pour atteindre 95 p. 100 dans l'anthracite, qui est le dernier terme hydrocarburé avant d'arriver au graphite, ou carbone pur. Ce qui compense cette augmentation de carbone, c'est surtout la diminution de l'oxygène, tombé progressivement de 30 à 2,50 p. 100 ; puis celle de l'hydrogène descendu de 6,50 p. 100 à 2 p. 100.

En même temps, la teneur en matières volatiles s'abaisse de plus en plus, tombant à 3 p. 100 dans l'anthracite, avant de disparaître dans le graphite. On prend souvent, comme caractéristique, le rapport $\frac{O + Az}{H}$ ou, plus simplement $\frac{O}{H}$, qui, de 6 dans la tourbe, descend à 3 ou 4 dans le lignite, à 2 dans les houilles maigres à longue flamme, à un peu plus de 1 dans les houilles grasses, et parfois à 0,50 dans les anthracites. Dans cette composition élémentaire, on distingue encore l'hydrogène total, l'hydrogène correspondant à la combinaison en eau avec l'oxygène (1/8 du poids de l'oxygène) et enfin l'hydrogène disponible pour la combustion, qui est la différence des deux, si l'on suppose, par une pure hypothèse, l'autre déjà combiné en eau.

Ces compositions chimiques, si variables d'une houille à l'autre, et qui classent ces corps en une sorte de série continue à applications diverses, sont très probablement dues au mélange, en proportion variable, d'un certain nombre de composés définis. Suivant que l'un ou l'autre de ces composés augmente, on conçoit que telle ou telle propriété doit se développer. Il est singulier que les connaissances chimiques soient si peu développées sur des substances d'un emploi aussi vulgaire et que l'on sache aussi peu de chose sur leur composition réelle.

Dans l'usage pratique des combustibles, bien des considérations influent, que nous laisserons ici de côté : la teneur en cendres et la nature plus ou moins phosphoreuse de ces cendres (pour les applications métallurgiques), l'état de siccité, la division en fragments plus ou moins gros (*pérat* de plus de 5 décimètres cubes, *gaillette*, *menu*, *tout venant*). Si l'on envisage le combustible théorique, supposé exempt de cendres et d'eau, le premier élément important de distinction est le *pouvoir calorifique*,

¹ Th. Schlœsing a montré que l'azote de la houille renfermait la même quantité d'argon que celui de l'air (4,1 p. 100) et devait donc représenter de l'« air fossile », emprisonné dans la houille depuis sa formation. De même, le phosphore et une partie du soufre proviennent des plantes qui ont formé la houille. Nous avons déjà rappelé p. 7, les recherches de Moureu et Lepape sur les gaz rares du grisou.

c'est-à-dire le nombre de calories dégagé par la combustion complète d'un kilogramme : pouvoir calorifique très supérieur à celui que l'on obtient pratiquement dans un foyer plus ou moins bien installé. L'échauffement produit par un combustible résulte à la fois de la combustion de son carbone et surtout de celle de son hydrogène disponible. On a donné, par suite, diverses formules pour calculer ce pouvoir calorifique d'après la composition élémentaire, notamment la suivante (loi de Dulong) : $8\ 080 \times C + 34\ 462 \times (H - O/8)$, dans laquelle C représente la teneur en carbone, 8.080 le pouvoir calorifique du carbone, 34462 la chaleur de combustion de l'hydrogène, $H - O/8$ l'hydrogène disponible. Cette formule se vérifie à peu près pour les houilles et pour l'asphalte, fort mal pour les huiles minérales, dont la composition est extrêmement compliquée ¹. L'expérience a montré qu'il était beaucoup plus simple de déterminer directement ce pouvoir calorifique dans la bombe calorimétrique. Les chiffres moyens que nous donnons montrent comment ce pouvoir calorifique s'élève d'abord de 6 000 dans les lignites, à 8 700 dans les charbons à coke pour redescendre à 8 200 dans l'anhracite, et 7 910 dans le graphite. Il y a accroissement avec la teneur en matières volatiles jusqu'à 25 p. 100, diminution au delà. Cela tient à ce que, dans les termes surcarburés, la perte tenant à la diminution de l'hydrogène, dont le pouvoir calorifique est très élevé, fait plus que compenser le bénéfice résultant de l'augmentation du carbone. Pour la même raison, les huiles minérales, qui sont toutes très hydrogénées, ont toujours un pouvoir calorifique notablement supérieur à celui des charbons. Ce pouvoir est, chez elles, d'autant plus grand que l'huile est plus dense ; ce qui correspond à une teneur en carbone plus forte, avec un peu moins d'hydrogène, il est vrai, mais aussi moins d'oxygène pour saturer celui-ci. On atteint ainsi plus de 11 000 calories.

Après le pouvoir calorifique, il y a lieu de considérer la *température d'inflammation*, qui facilite plus ou moins l'usage d'un combustible. Ainsi, du bois sec prend feu à 300 degrés, de la tourbe à 250 degrés, du charbon de bois à 250 degrés. Les houilles s'enflamment à 5 ou 600 degrés. Avec l'anhracite chauffée à l'air, il faut atteindre 800 degrés et la température théorique pour le graphite est déjà de 700 degrés. Par suite on a beaucoup de mal à allumer l'anhracite et, une fois allumé, ce combustible ne brûle bien que si le volume en ignition est suffisamment grand. Par contre, l'huile minérale peut s'enflammer à des températures si basses qu'on a dû faire des règlements pour en interdire l'emploi quand cette température descendait au-dessous de 35 degrés. La proportion de matières volatiles paraît ici être l'élément prépondérant.

C'est cette *proportion de matières volatiles* qui, en déterminant une flamme plus ou moins longue, rend le combustible approprié à tel ou tel usage. Un combustible est à flamme longue quand il tient plus de 30 p. 100 de matières volatiles. Les flammes longues sont favorables pour les chauffages qui doivent être effectués à une distance un peu forte du foyer, comme dans les chaudières à vapeur ou les fours à réverbère. Au con-

¹ Parmi les hydrocarbures gazeux, les uns, comme l'éthylène et l'acétylène, absorbent de la chaleur dans leur formation ; d'autres, comme le formène, en dégagent.

traire, les houilles les plus pauvres en matières volatiles et, par conséquent, à flamme courte, seront employées de préférence dans les poêles d'appartement et dans les fours à cuve, parce que les matières volatiles, se dirigeant vers le haut des appareils, c'est-à-dire loin de l'arrivée d'air qui est faite par le bas, distilleraient en pure perte sans être brûlées.

La *température de combustion* du carbone dans l'air, avec formation d'acide carbonique, est d'environ 2 000 degrés ; mais, pratiquement, les foyers ne dépassent guère 1 300 à 1 400 degrés.

On envisage enfin le *pouvoir agglomérant* de la houille, qui tient à ce qu'elle se ramollit partiellement vers 350 à 400 degrés, de telle sorte que les parties fines se réunissent en une masse compacte, facile à maintenir sur les grilles. C'est cette propriété qui permet de fabriquer du coke. Toutes les houilles se ramollissent à la même température : ce qui tient évidemment à l'intervention d'un composé défini, le même dans toutes ; mais la proportion de ce composé est très variable et fait par là varier le pouvoir agglomérant. La faculté de fournir du coke de bonne qualité se développe avec une teneur moyenne en matières volatiles de 16 à 30 p. 100, qui correspond à 85 ou 90 p. 100 de carbone. On a là des houilles, dites grasses, dont le pouvoir calorifique est le plus élevé. Des deux côtés de la série, que la teneur en carbone s'élève ou s'abaisse, ce pouvoir de donner du coke aggloméré disparaît. H. Le Chatelier a fait remarquer que ce carbone fusible vers 350 degrés, dont l'étude serait bien intéressante, devait être en même temps susceptible d'une oxydation lente à basse température. C'est sa présence qui fait que la houille, laissée à l'air, absorbe jusqu'à 6 et 8 p. 100 d'oxygène, perdant en même temps de ses qualités comme charbon à coke et charbon à gaz et pouvant donner lieu à des incendies spontanés dans les mines, les dépôts, les soutes de navire, etc.

En dehors de ses applications ordinaires, le groupe des combustibles comprend quelques corps à emplois particuliers dont nous parlerons brièvement. Le jais et l'ambre, utilisés en bijouterie, sont des cas particuliers dans les formations ligniteuses. Les bogheads, cannelcoals et naphtoschistes forment une série, dont le terme le plus carburé et, en même temps, le plus pauvre en matières volatiles est une houille maigre à longue flamme.

2^e JAIS¹

Usages. — Le *jais* ou *jayet* n'est autre chose qu'un lignite d'un noir luisant employé dans la bijouterie et qui, au microscope, se montre, d'ordinaire, entièrement constitué par un lissu ligneux, où les espaces intercellulaires sont remplis par une substance amorphe. Son nom vient du fleuve Gages, en Lycie, d'où on le tirait dès le temps de Pline. Sa valeur tient à ce qu'il est plus noir que le lignite ordinaire et peut recevoir un beau poli. Ses propriétés sont celles du lignite, dont nous le séparons seulement ici, en raison de son usage : densité de 1,26, combustibilité

¹ Collection de l'École des Mines, nos 1819 et 1564. — Voir 1863. *Lignite et jayet du canton de Berne* (Bull. Ann. des Min., 6^e série, t. 5, p. 496). — 1888. DAVIES, p. 202.

facile, etc. Il est formé de 75 à 80 de carbone, 4,5 à 5,5 d'hydrogène, 13 à 20 d'oxygène, 0,50 d'azote, 1 à 2 de soufre.

Pour l'employer, on commence par l'user jusqu'à la forme voulue sur des meules en grès, puis on le polit comme une pierre précieuse.

Il subit la concurrence très vive du jais artificiel, qui n'est autre chose que du verre noir. Mais il a, sur lui, l'avantage d'être infiniment plus léger. Ses emplois sont très restreints.

Le prix des belles qualités varie de 30 à 40 francs le kilogramme.

Gisements. — Les gisements sont : 1° l'Angleterre à Whitby, dans le Yorkshire, où l'on en produisait, il y a quelques années, 3 à 4 000 kg. par an et le Cleveland ; 2° l'Espagne, dans les Asturies, la Galice et l'Aragon (Montalban) ; 3° la France dans l'Aude, à Sainte-Colombe sur l'Hers, Peyra, La Bastide, près Quillan, etc. (gisements épuisés)¹ ; et à Peynier (Bouches-du-Rhône), dans le sénonien ; 4° la Saxe, près de Wittenberg.

A Whitby, on a exploité des poches de jais allant de quelques grammes à 100 kg., qu'on trouvait dans les parties les plus dures de schistes aluminieux du lias.

A Scarborough et à Skye, le plantbed bathonien contient également du jayet.

3° AMBRE²

Propriétés et usages. — Il existe, on le sait, deux espèces d'ambre absolument différentes, l'une qui ne nous intéresse pas ici, l'ambre gris envisagé comme une concrétion morbide formée dans l'estomac d'une sorte de cachalot et qu'on trouve flottant sur la mer près des côtes de Madagascar, des Moluques, du Japon, etc... ; l'autre, l'ambre jaune ou *succin*, qui est une résine fossile³. L'ambre jaune a joué le rôle d'ornement dès la préhistoire et, comme ses gisements sont très restreints, on a tiré de sa présence des conclusions, parfois un peu hardies, sur les migrations des peuples. C'est la première substance qu'on ait vue s'électriser par le frottement ; son nom grec était *electron*, d'où vient électri-

¹ La taille du jayet occupait, à Sainte-Colombe : 1 200 ouvriers au XVIII^e siècle, 150 en 1806. Cette industrie a disparu.

² 1875. PFANNNSCHMIDT. *Ueber Bernstein, seine Gewinnung und Verwendung in der Lakfabrikation* (München. Ed. Mühlthaler). — 1879. *Exploitation de l'ambre en Prusse* (Cuyper, t. 27, 413). — 1879. GOEPPERT. *Sull ambrà di Sicilia*. Rome (acc. Lincei, 3^e série). — 1879. CAPELLINI. *Ambrà a Merlano presso Sarigno nel Bolognese* (acc. Lincei, 3^e, 3, 249). — 1883. GOEPPERT UND MENGE. *La flore du succin.*, t. I. Dantzig, in-4^e, — 1886. *L'ambra* (Milan). — 1890. KUNZ. *Ambre au Mexique* (La Nature, 20 février). — 1890. BOMBICCI. *La collezione di ambre siliciana* (Bologna). — 1890. AL. JACOB. *Article Electrum du dictionnaire des antiquités grecques et latines*. — 1890. H. CONWENTZ. *Ueber die Verbreitung des Succinits* (Schr. d. Naturf. Ges. in Dantzig, t. 7, 3, p. 165). — 1893. *Statistique de l'Engineering*, p. 531. — 1894. KÖEPPEN. *Ambre en Russie* (C. R. Z. f. pr., G., p. 100). — 1898. *Ambre d'Allemagne et d'Amérique* (Z. f. pr. G., p. 221). — 1899. *Ambroid*. (Un. St. geol. Survey, t. 20 part VI, p. 598). — 1900. H. CONWENTZ. *Monographie der baltischen Bernsteinbäume* (Dantzig). — 1901. P. DAHMS. *Ueber das Vorkommen und die Verwendung des Bernsteins* (Z. f. pr. G., p. 201-214 et bibl.). — 1910. L. DE LAUNAY. *Ambre en Birmanie* (Les Richesses minérales de l'Asie, p. 6 et 49 et bibl.). — 1910. L. DE LAUNAY. *L'industrie de l'ambre* (la Nature, 8 juin).

³ Il existe, en dehors du succin, d'autres résines fossiles, comme la copaline, la gédanite, la glessite, la stantiénite, la beckérite, la pyropissite, la rétinaspalte, etc.

cité. Ses usages actuels sont d'abord les articles de fumeurs (tuyaux de pipes, bouts de cigare), puis les colliers de perles surtout à la mode en Allemagne, enfin la fabrication du vernis gras. La proportion pour une année est environ la suivante (prix en gros) : articles de fumeurs 2.700.000 francs, perles 192.000 francs, vernis 238.000 francs¹.

La valeur très variable est, en moyenne, sur le marché américain, de 23 fr. le kg. 250 ouvriers travaillent au sertissage à Königsberg.

Provenance. Statistique. — On extrait l'ambre presque uniquement des dunes sablonneuses sur les bords de la Baltique, entre Memel et Königsberg dans ce qu'on appelle le Kurische Haff et le Samland et, secondairement, de leur prolongement au Nord en Courlande. La Birmanie supérieure en produit également une certaine quantité.

A titre minéralogique, il existe une très vaste zone à succin d'âge éocène, qui part de l'Est de l'Angleterre, touche aux environs de Paris (Vaugirard), couvre la Hollande, tout le Nord de l'Allemagne, le Danemark, la pointe Sud de la Suède, une large partie de la Russie depuis le Sud de la Finlande jusqu'à la mer Noire et s'étend enfin jusqu'au versant Est de l'Oural ou jusqu'à la mer Blanche. Ailleurs encore on retrouve de l'ambre : sur la côte autrichienne de l'Adriatique; en Roumanie; dans la montagne de Sibdiz, district Buzeu; en Sicile, près de Catane¹; au Mexique (Oaxaca); aux Etats-Unis (New-Jersey, Maryland, et Caroline du Nord), etc...

Voici quelques chiffres donnant la production d'ambre en Prusse et le nombre d'ouvriers employés à leur extraction.

TABLEAU 19. PRODUCTION DE L'AMBRE EN PRUSSE

	MINES		DRAGAGES		PLONGEURS		DÉBRIS	TOTAL des ouvriers.	TOTAL DE la production
	ouvriers.	tonnes.	ouvriers.	tonnes.	ouvriers.	tonnes.	tonnes.	ouvriers.	tonnes.
1885	850	67	700	108	100	4,75	3,75	1 650	183,50
1890	500	50	650	145	100	2,50	4,00	1 540	201,50

Le droit d'exploiter l'ambre est affermé moyennant 875.000 fr. par an depuis 1866 et la production d'ambre à l'état brut vaut environ 2.250.000 fr.

En *Birmanie*, la production d'ambre dans le district de Myitkyina est en complète décadence et ne donne que de très maigres profits. En 1905, on extrayait encore 6.300 kg. valant 23.000 fr. En 1906, la production ne valait plus que 17.600 francs. En 1907, elle est tombée à 2.500 kg. valant 10.000 fr. : ce qui fait ressortir le cours moyen sur place à 4 fr.

Origine géologique. Gisements du Samland. — L'ambre est une résine fossile, que l'on trouve, comme nous venons de le dire, à titre accessoire,

¹ J'ai résumé ce qui concerne le traitement industriel de l'ambre dans la *Nature* du 8 juin 1910.

sous forme de nodules disséminés, dans un certain nombre de terrains associés à des formations lignitifères, mais qui n'a pris, en somme, un réel développement qu'en un seul point du monde, sur la côte allemande de la Baltique : ce qui montre le caractère exceptionnel des conditions réalisées dans cette région spéciale. On y trouve emprisonnés de très nombreux insectes, arachnides et myriapodes, qui ont fourni une précieuse contribution à la faune éocène.

Pour expliquer sa venue, on avait imaginé un moment l'intervention d'un Pin spécial, le *Pinus succinifera* (comme on avait supposé une *Gallionella ferruginea* pour les minerais de fer des marais). Bombicci a montré qu'elle était beaucoup plutôt produite par l'altération chimique progressive de divers débris végétaux que par une résine particulière. Pour Conwentz, c'est un cas pathologique. La forêt de pins, qui existait dans le Samland à l'époque éocène, était tout entière malade et la résine qui s'écoulait de ses blessures subissait la « succinose ». De toutes façons, l'ambre ayant été formé, le terrain sur lequel avait existé la forêt a été recouvert par la mer oligocène (tongrienne), dont les sables glauconieux contiennent l'ambre en nodules.

La coupe des terrains à ambre est, de haut en bas, la suivante : Humus, 1,50 m. — Diluvium, 9,50 m. — Sable strié, 6 m. — Lignite, 1 m. — Sable blanc, 5 m. — Sable vert grossier, souvent aquifère à la base, 8 m. — Niveau de la mer. — « Terre bleue » tenant 500 gr. à 2 kg. d'ambre au mètre cube et se terminant à la base par des sables glauconieux stériles, 6,60 m.

Cette couche, dite de « terre bleue », est rarement au-dessus de la mer (à Dirckheim et Marscheiten). Ailleurs, elle descend jusqu'à 15 m. de profondeur, comme à Palmnicken et ne peut alors être exploitée que par mines. Enfin un remaniement alluvionnaire a donné des gîtes détritiques, tels que ceux exploités de 1860 à 1890 dans le Kurische Haff à Schwarzott, où l'on a trouvé des objets d'ambre travaillés à l'époque néolithique.

Au début, on a longtemps cherché l'ambre sur le rivage ou dans des fouilles à ciel ouvert. Plus tard, on a dragué les sables sous la mer et l'on a travaillé par mines sur le continent, comme le montre le tableau précédent.

Autres gisements. — En *Russie*, les couches à succin du Samland allemand semblent se prolonger ; on recueille près de 2 tonnes d'ambre par an en Courlande.

En *Sicile*, on trouve de l'ambre en assez grande abondance sur la plage de Catane¹ et dans des marnes tertiaires près de Gianetta ; cet ambre est particulier par sa fluorescence.

En *Birmanie*, l'ambre extrait dans le district de Myitkyina est associé de même à des lignites tertiaires.

Au *Mexique*, l'ambre jaune est très commun dans l'Oaxaca et les États voisins ; on prétend même que des indigènes s'en servent pour faire du feu.

¹ D'où provient une belle collection rassemblée au musée de Bologne.

4^e CANNELCOALS, BOGHEADS, PYROPISSITES, etc.¹

Avant d'étudier les naphtoschistes, nous croyons utile de signaler un certain nombre de corps appartenant encore à la série des combustibles, qui montrent le passage progressif de ceux-ci aux schistes dits bitumeux.

Cannelcoal. — Le cannelcoal est une véritable houille, ainsi nommée à cause de la facilité avec laquelle on peut en allumer un morceau, qui brûle ensuite avec une flamme éclairante comme une chandelle (cannel). Il contient plus de 40 p. 100 et parfois jusqu'à 60 p. 100 de matières volatiles : ce qui le place, dans la série des combustibles, entre les houilles sèches à longue flamme et les lignites. Extérieurement il se distingue de la houille par sa couleur brune et par sa dureté. Sa cassure est esquilleuse.

Le cannelcoal, examiné au microscope, apparaît sous forme d'une résine brune tenant en suspension des débris noirs organiques ou inorganiques, parmi lesquels abondent des parties végétales. Il est riche en spores, mais caractérisé surtout par des touffes de filaments ramifiés, qui paraissent avoir appartenu à des algues.

Les cannelcoals contiennent une proportion de cendres analogue à celle des houilles. Abstraction faite de celles-ci, leur composition donne 80 à 85 p. 100 de carbone, 7 à 8 d'hydrogène, 9 d'oxygène, 1 d'azote. La teneur en soufre, d'environ 3 p. 100, les rapproche des lignites et, comme nous le verrons plus loin, de certains bitumes.

Découvert dans le Lancashire au xvii^e siècle, le cannelcoal est surtout employé dans la fabrication du gaz de houille pour l'augmentation de son pouvoir éclairant. Certains cannelcoals d'Ecosse donnent à la distillation jusqu'à 550 litres d'huile de paraffine par tonne.

Les gisements sont nombreux. On peut citer le Lancashire et l'Ecosse², les mines de Montrambert, de Commentry, d'Autun en France, celles de Teberga dans les Asturies (Espagne). La couche écossaise, dite Parrot coal, épaisse de 0,90 m., appartient au dinantien.

Boghead. — Le boghead se rapproche à la fois des houilles par le cannelcoal et des naphtoschistes.

C'est un combustible très riche en matières volatiles (55 à 60 p. 100), qui peut, comme le cannelcoal, être utilisé pour augmenter le pouvoir éclairant du gaz de houille. La proportion de cendres y est telle d'ordinaire qu'on peut le considérer comme un véritable schiste imprégné d'hydrocarbures. Il est noir, lisse, d'aspect gras, sectile, à cassure conchoïdale.

Sa poussière est noire. Il brûle avec une flamme fuligineuse. Au microscope, on le voit composé de très petites lentilles assimilables à des spores et moulées dans une résine peu colorée. On y a reconnu des algues d'eau douce. Sa composition élémentaire, après élimination des cendres, correspond à 75-82 de carbone, 10-12 d'hydrogène, 6 à 7 d'oxygène, 1 d'azote, 0,40 de soufre. Cette pauvreté en soufre est une différence

¹ Coll. Ecole des Mines, 1831 et 1832.

² Voir plus loin, page 459, une coupe du dinantien écossais.

importante avec le cannelcoal. Chauffé en vase clos, il donne des huiles contenant des hydrocarbures $C^n H^n$, $C^n H_{2n-6}$, des goudrons, etc.

On en trouve dans d'assez nombreux bassins charbonneux : particulièrement, en France, dans le stéphanien ou le permien.

On cite comme gisements : en Ecosse, Boghead (qui lui a donné son nom), Bathvale, Torbane Hill (d'où vient son nom de Torbanite); en France, le bassin d'Autun et, à titre minéralogique, Commentry (Allier); en Nouvelle-Ecosse (Canada), les mines Fraser et Hillsborough.

Le bassin d'Autun produit actuellement 11 000 t. de boghead par an.

Pyropissite, etc. — On peut rapprocher des bogheads une variété de lignites, dite *pyropissite*, exploitée en Saxe, à Weissenfels, pour la fabrication de la paraffine. Le dépôt se trouve dans un des golfes qui terminaient au Sud la mer oligocène de l'Allemagne

On a encore décrit, sous le nom de *zoocarbonit*, des couches constituées surtout par des matières animales, où l'on reconnaît de nombreuses écailles et jusqu'à des corps entiers de poissons. Le principal gisement est, dans le bassin de Sarrebruck, à Munsterappel, près de Lebach.

5° AMPÉLITES¹

On désigne, sous le nom d'ampélites, ou pierres des charpentiers, certains schistes charbonneux noirs, assez fortement chargés de pyrite pour être employés comme amendement dans la culture de la vigne¹, que l'on trouve dans divers terrains primaires. On s'en sert parfois en teinture.

L'horizon des ampélites à graptolites est développé dans le silurien de Bretagne. On les exploite à Poligné (Canton de Bains, au Sud de Rennes). L'horizon se poursuit de là à Andouillé, à Gaudinière, à Caratel (Loire-Inférieure, région de Chateaubriand) à Albaratz, entre Moze et Vern (NW d'Angers). On le retrouve encore vers Saint-Sauveur de Flée au Nord de Segré. Ces ampélites forment des lentilles, très souvent subordonnées à un système de grès et doivent être considérées comme un sédiment littoral ou lagunaire.

On connaît un horizon contemporain de schistes carburés dans le gothlandien des Pyrénées, à l'hospice de Vénasque et à travers les vallées d'Arreau et de Pierrefitte.

II. — SCHISTES BITUMINEUX (NAPHTOSCHISTES ET PYRO-SCHISTES)²

Les divers combustibles précédemment étudiés nous ont amenés progressivement jusqu'aux schistes dits bitumineux, dont l'usage habituel

¹ Ampélite vient de ἀμπέλος, vigne.

² Nous conservons le nom de schistes bitumineux, bien qu'il soit évidemment impropre, parce qu'il est généralement usité. Chimiquement, on devrait réserver le nom de schistes bitumineux pour les schistes renfermant un bitume tout formé, susceptible de s'en écouler naturellement ou d'en être extrait par la benzine. Les naphtoschistes ne donnent, au contraire, du goudron que par distillation.

n'est pas de fournir des combustibles, mais de donner par la distillation une huile minérale analogue au pétrole. Les mêmes étages sédimentaires contiennent souvent simultanément des houilles maigres ligniteuses, des bogheads et des naphtoschistes. En outre, contrairement à ce que nous verrons pour les produits réellement bitumineux comme le sable bitumineux, l'asphalte, etc. il n'est guère contestable que les naphtoschistes occupent, dans la sédimentation, la place de leur dépôt originel. On doit présumer, sans pouvoir préciser encore comme on le voudrait, que, suivant la nature des matières organiques accumulées et le processus de la décomposition subie, il s'est formé, dans un mélange complexe, tantôt tel carbure prédominant, tantôt tel autre: d'où la diversité des houilles, lignites, cannelcoals, bogheads, naphtoschistes, etc... Il est permis, d'autre part, de se demander si des conditions analogues n'ont pas, vers le même moment et dans les mêmes conditions générales de sédimentation, produit les dépôts originels, dont dériveraient les nappes superposées de pétrole. Nous reviendrons tout à l'heure sur cette question en parlant des gisements.

Nature et propriétés. — Les schistes bitumineux, ou, plus exactement, les pyroschistes et naphtoschistes, que l'on appelle encore *schistes combustibles*, *schistes carburés*, *brandschiefer* (en Saxe) ou *schistes à Kérosène*, forment des masses noires, clivables suivant la schistosité et d'une odeur caractéristique. Leur poussière est brune, leur poids spécifique est voisin de 2. Les débris organiques visibles à l'œil nu y abondent et l'acide fluorhydrique étendu en sépare d'ordinaire de nombreuses parcelles végétales, notamment des fragments d'organes foliaires. Chimiquement, on a affaire à un schiste imprégné de substances hydrocarburées et non, comme dans le cas des houilles, à des mélanges hydrocarburés pouvant renfermer des parcelles de schistes susceptibles d'être éliminées par triage. Ici les hydrocarbures font corps avec le schiste imprégné, dont la distillation seule arrive à les séparer. On a toutes les transitions depuis le schiste stérile jusqu'au boghead précédemment étudié, qui arrive à donner (en volume) 50 à 56 p. 100 d'huile brute. Dans le Dorsetshire, on a eu des schistes à 22 p. 100. Plus normalement, les schistes d'Ecosse rendent 120 litres à la tonne, soit 11 p. 100 en poids. La moyenne française est beaucoup plus faible, à peine 50 litres. On n'obtient à Autun, dans la grande couche, que 7 p. 100 d'huile brute, à Buxière que 5 à 6 p. 100. La teneur totale en matières volatiles, obtenue par distillation en vase clos, peut varier de 10 à 20 p. 100, dont les 5 à 11 p. 100 d'huile brute signalés plus haut, 3 à 6 d'eau ammoniacale, 3 à 5 de gaz. On obtient, en outre, des goudrons et des paraffines¹.

Comme éléments accessoires, d'assez nombreux schistes bitumineux renferment des produits métallifères, parfois en quantité suffisante pour devenir exploitables (cuivre au Mansfeld, mercure à Idria). Nous aurons plus tard à envisager, à ce propos, deux hypothèses : la première, la plus généralement adoptée, supposant une concentration lagunaire de métaux

¹ Nous reviendrons sur les produits de la distillation des Naphtoschistes à propos de leurs usages, pages 453 et 454.

effectuée dans les bassins de sédimentation, avec action réductrice précipitante des hydrocarbures destinés à former les schistes bitumineux, dans les conditions où la pyrite se dépose si souvent sur la houille; la seconde, plus nouvelle, d'après laquelle une imprégnation ultérieure de caractère filonien aurait subi la même influence réductrice et précipitante des hydrocarbures.

Historique, Traitement et Usages. — L'emploi industriel des schistes bitumineux consiste à les soumettre à des distillations successives, au moyen desquelles sont obtenus, comme nous allons le voir, le pétrole lampant français, le pétrole pour moteurs (de densité 800 à 850), les huiles de graissage, les goudrons, les paraffines.

Les premiers essais pour obtenir de l'huile de schistes furent faits en 1830 par Laurent de Reichenbach. Selligie, en 1839, aboutit le premier à Autun à un résultat pratique. Puis Young, en 1845, commença à distiller en grand les bogheads d'Ecosse, auxquels se sont ajoutés, puis substitués depuis 1862, les schistes. Une industrie semblable s'établit, en 1856, à Weissenfels en Saxe. En 1858, on commença à exploiter le bassin de Buxière (Allier) et, en 1862, celui d'Autun (Saône-et-Loire).

Cette industrie, qui a eu son époque de prospérité, fut bientôt atteinte, en Ecosse comme en France, par l'invasion des pétroles américains, contre lesquels elle lutte assez péniblement.

Le *traitement* comprend toujours deux opérations essentielles : une distillation des schistes produisant de l'huile brute et une rectification donnant diverses huiles d'éclairage. Nous commencerons par en dire quelques mots ¹.

La distillation se fait en général, en France, dans des cornues verticales en fonte de 13 à 16 hectolitres de capacité, où le schiste lui-même, après distillation, fournit en brûlant la chaleur nécessaire pour la distillation d'une charge nouvelle; les cornues tournantes, qu'on avait beaucoup préconisées un moment, ont été abandonnées. En Ecosse, le traitement, plus perfectionné, se distingue par l'intervention de la vapeur d'eau injectée sous forte pression dans la masse distillée et, en second lieu, par la température beaucoup plus élevée à laquelle est porté le schiste. On est obligé alors d'employer des cornues en briques réfractaires au lieu de cornues en fonte, et de chauffer par des gazogènes. Mais on double ainsi la quantité d'ammoniacque : ce qui était, pour l'industrie écossaise, une question de vie et de mort.

La distillation des schistes donne d'abord des eaux plus ou moins ammoniacales (50 à 60 litres par m³ pesant 1 250 kg.), puis des gaz incondensables et enfin, suivant les régions, 50 à 100 litres d'huile brute ayant pour densité moyenne 850 à 900.

Ces huiles brutes valent environ 10 à 12 fr. l'hectolitre, et donnent, à leur tour, par des distillations successives, avec traitement à l'acide sulfurique et à la soude, des produits divers qui, dans nos bassins français, sont les suivants, par hectolitre :

¹ Voir 1888. L. DE LAUNAY. *Schistes bitumineux de l'Allier* (Rev. Scient. du Bourbonnais). — 1892. CHESNEAU. *Rapport sur l'industrie des huiles de schiste en France et en Angleterre* (Impr. nationale).

BUXIÈRE (ALLIER)	AUTUN
28 à 30 p. 100 d'huile lampante (810 à 820) à 25 fr. . . = 7,50	35 à 40 p. 100 huile lampante à 820. 4 p. 100 huiles lourdes (860 à 868).
30 à 40 p. 100 d'huiles lourdes (870 à 925) à 14 fr. . . = 5,60	25 p. 100 huile verte (895).
20 p. 100 de goudron à 5 fr. = 1,00	20 p. 100 de goudron (960).
12 à 20 p. 100 de perte (gaz com- bustibles, etc.).	14 p. 100 perte.
<hr style="width: 20%; margin-left: auto; margin-right: 0;"/>	
14,10	

Les huiles lampantes sont très difficiles à brûler et ne peuvent être utilisées que par coupage avec les huiles américaines plus hydrogénées et plus légères : d'où beaucoup de fluctuations de prix, qui se reproduisent également pour les goudrons.

Les chiffres précédents ne donnent donc qu'une idée approximative des *prix de vente* des divers produits. Les *frais* correspondants, dans le bassin de Buxière, sont environ les suivants par hectolitre d'huile brute :

Extraction.	{	Salaires	5,40	}	9.10
		Achats divers, chevaux	2,10		
		Travaux de premier établissement.	1,00		
1 ^{re} distillation.	{	Frais de bureau	0,60	}	2.20
		Salaires d'ouvriers.	0,85		
		Entretien et réparation des cornues.	0,85		

chiffres auxquels il convient d'ajouter, pour la rectification :

Main-d'œuvre	0,255
7 k. 78 Acide sulfurique à 18 fr. le quintal.	1,40
2 k. 52 Soude à 30 fr. le quintal.	0,755

ce qui donne un prix de revient total de 13,70 fr.

En dehors de l'huile d'éclairage et de l'huile à graisser, le schiste fournit un goudron, qui trouve son emploi dans la fabrication des mastics asphaltiques comme addition au bitume de la Trinidad.

En Ecosse, comme nous le verrons, on attache une importance spéciale à l'extraction de la paraffine et du sulfate d'ammoniaque. Pour extraire la *paraffine* de l'huile à 860, on la soumet à une réfrigération, on comprime à la presse hydraulique et on raffine par des *sweatings*, ou « suages », qui donnent un produit blanchi, presque exclusivement destiné à la fabrication des bougies.

D'autre part, les eaux de la distillation, contenant du carbonate et du sulfate d'ammoniaque, sont envoyées dans un cylindre clos, où des jets de vapeur les pulvérisent, puis traitées par l'acide sulfurique. Le sulfate d'ammoniaque est vendu comme engrais aux agriculteurs.

Finalement, les produits marchands se répartissent, comme il suit, pour 100 litres d'huile brute (le rendement des schistes en huile étant, en Écosse, de 120 litres à la tonne).

4,6 p. 100 d'essences diverses de densité 660-730 (gazolines, naphthes, etc.)	0,89
38,5 p. 100 d'huiles lampantes (800-832)	3,15
24,6 p. 100 d'huiles lourdes (840-890).	1,64
10 k. 1 de paraffine brute, ou 10 k. de paraffine raffinée	8,94
9 k. 3 de sulfate d'ammoniaque.	2,60
	17,22

Enfin, à Weissenfels, en Saxe, la tonne de schistes rend de 5 à 7 p. 100 d'huile brute, qui elle-même fournit 15 p. 100 de paraffine, valeur 250 à 575 fr. la t. Ce district produit par an (1890), environ 60 000 t. d'huile brute, donnant 45 000 t. de produits finis.

Statistique. — Les statistiques internationales comprennent généralement, sous le nom de produits bitumineux, des substances très diverses, telles que les schistes bitumineux, les asphaltes, les bitumes, etc. Comptés ainsi en bloc, les chiffres sont :

TABLEAU 20. — STATISTIQUE MONDIALE DES PRODUITS BITUMINEUX ¹

	Total des produits bitumineux		Prix moyen (francs ¹)	Décomposition Schistes et boghead
	1907	1909		
Écosse	2 733 000	3 015 000	6,82	sch. bit. et boghead 54 500 t. sable bitum. à 19 fr.
États-Unis	203 000	260 500	72,12	
France	177 000	169 000	8,17	32 000 t. gilsonite à 35 fr. 124 000 t. sch. bitum. à 4,59 41 000 t. asphalte et 6 000 t. boghead.
Italie	161 000	111 000	13,49	(bitume)
Trinidad	135 000	126 000	15,00	
Allemagne ²	127 000	77 500	11,54	
Cuba, Vénézuéla	41 000	45 000		
Australie	33 000	47 000	13,99	
Russie	20 400	12 800	41,00	

Comme le montre aussitôt ce tableau, l'*Ecosse* est le pays du monde où l'industrie des huiles de schistes est le plus développée. Fondée en 1845 par Young, cette industrie y occupe plus de 10 000 ouvriers, dont 5 000 dans les mines et 5 000 dans les usines et produit annuellement 300

¹ Les prix de vente moyens, qui varient de 72 fr. aux États-Unis à 6,82 fr. en Écosse, indiquent assez qu'il ne s'agit pas de substances semblables. De 1907 à 1909, ils ont notablement baissé : de 9,20 fr. à 8,17 fr. en France ; de 7,44 fr. à 6,82 fr. en Écosse.

² Ce chiffre ne doit pas comprendre les lignites de Weissenfels.

à 350 millions de litres d'huile brute provenant de la distillation d'environ 3 000 000 t. de schistes

Le gisement exploité est compris dans les comtés de Mid Lothian et West Lothian, à l'Ouest d'Edinburgh près du golf de la Forth.

Les principaux producteurs sont la *Young's Paraffine* qui produit le quart de l'extraction totale (mines de Newliston, usines d'Addiewell et Uphall) et la *Broxburn*, qui en produit 450 000 t.

On a commencé par exploiter du boghead, aujourd'hui épuisé. On travaille maintenant sur 4 couches de schistes bitumineux très riches, donnant 120 litres d'huile brute par tonne contre 50 litres en moyenne en France.

Après une prospérité remarquable de 1875 à 1886, l'industrie des

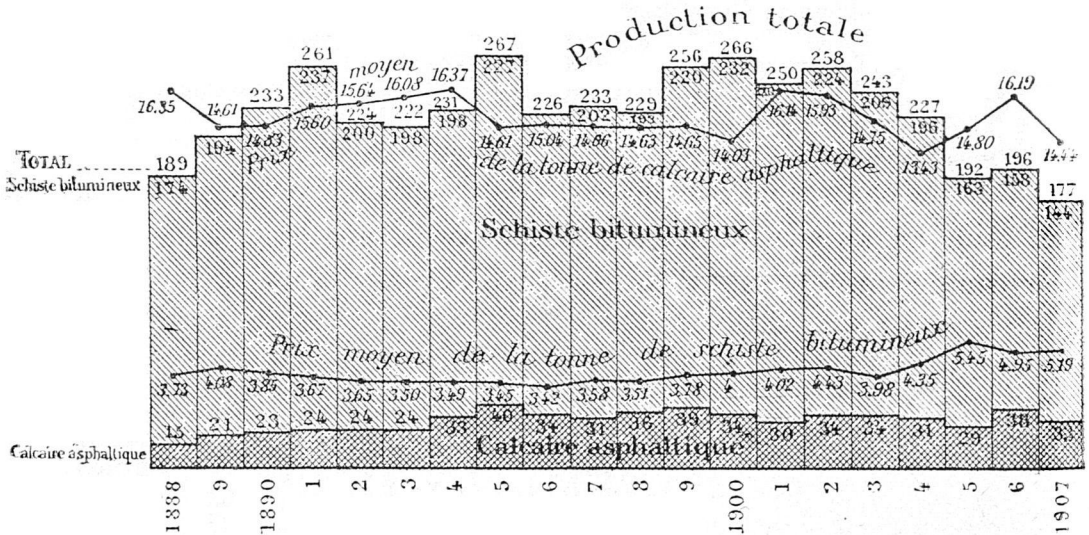


Fig. 57. — Statistique des produits bitumineux en France.

huiles écossaises a eu un moment beaucoup de peine à lutter contre la concurrence des pétroles américains. Le gallon d'huile lampante¹, qui valait 1,75 fr., est tombé à 0,60 fr. ; la paraffine raffinée est tombée de 2 fr. à 1 fr. le kg. ; le sulfate d'ammoniaque a baissé de 500 fr. à 250 fr. la tonne. Néanmoins on a réussi à vivre, grâce à la richesse des matières traitées et à l'amélioration des procédés de traitement. C'est surtout, comme nous le verrons plus loin, par l'augmentation du rendement en paraffine et en sulfate d'ammoniaque que l'on a pu se sauver.

Finalement, la production écossaise alimente, pour un tiers, en huile brute et, pour moitié, en paraffine la consommation nationale.

Il y a, en Ecosse, 117 fabriques situées entre Straiton et Burntisland au S. E. et N. E. et Cobbinshaw et Linlithgow au S W et N W.

En France, les produits traités sont moins riches en huile ; ils con-

¹ Un gallon américain (wine gallon), différent du gallon impérial, représente 3,785 litres. Le baril de 42 gallons équivaut à 159 litres, ou 129 kg.

tiennent également beaucoup moins de paraffine (2 à 3 p. 100 contre 12 p. 100 en Ecosse) et l'on n'en extrait pas de sulfate d'ammoniaque.

Un graphique ci-joint (fig. 57), montre la production des schistes bitumineux et bogheads, qui atteignait, il y a quelques années, environ 230 000 t. (237 000 en 1891, 227 000 en 1895, 232 000 en 1900), descendant progressivement à 144 000 t. en 1907 et 124 000 en 1909. Par contre, le prix moyen de la tonne (tel qu'il est compté sur le carreau de la mine pour le calcul des redevances) s'est élevé assez sensiblement de 3,50 à 4 francs (valeur moyenne entre 1888 en 1900) jusqu'à 5,45 fr. ¹ en 1905, pour redescendre à 4,59 en 1909. Cette production française est alimentée par deux centres : Bassin d'Autun avec 59 000 t. de schistes et 6 000 t. de boghead ; Bassin de l'Aumance dans l'Allier (Buxière, Saint-Hilaire) avec 57 000 t. A titre de comparaison, en 1884, l'Aumance donnait 42 000 t. ; Autun 133 500 t. de schistes et 4 700 t. de boghead.

La chute de la production provient donc uniquement du bassin d'Autun.

Enfin nous verrons qu'en *Saxe*, à Weissenfels, on traite des lignites oligocènes, particulièrement riches en paraffine, pour en extraire des huiles diverses et de la paraffine.

Généralités sur les gisements. — Il serait intéressant de classer les schistes bitumineux par étages géologiques afin d'examiner comment, à certaines époques spéciales, leurs gisements se répartissent par rapport aux conditions stratigraphiques et tectoniques. Nos renseignements ne nous permettent pas d'établir ce tableau aussi complet que nous le voudrions. Les descriptions, qui vont être données, montreront bien néanmoins les récurrences multipliées du phénomène. Car nous allons avoir à décrire des couches ordoviciennes au Canada, dinantiennes en Ecosse, permienne dans l'Allier, l'Autunois, la Saxe et le Mansfeld, liasiques en diverses provinces françaises, en Souabe, en Wurttemberg, dans le Banat, enfin tertiaires dans le Puy-de-Dôme.

Dans chacune de ces périodes principales, les régions où le dépôt s'est effectué paraissent avoir présenté des conditions pareilles, assez analogues à celles qui ont amené le dépôt des couches minces et régulières de houille.

Chaque fois, on est en transgression horizontale sur le bord d'une chaîne plissée relativement récente, mais dont le relief s'était émoussé, en sorte que l'ère des grandes destructions torrentielles et glaciaires est finie ou interrompue. Dans des lagunes en communication fréquente avec la mer, des débris de plantes s'accumulent, en même temps que des restes d'animaux et de poissons ; et, sans doute, certaines circonstances spéciales font que ces organismes en putréfaction sont vite recouverts par des vases sans remonter, comme cela arrive le plus souvent, se détruire par oxydation à la surface. Des couches de naptoschistes s'intercalent ainsi au milieu des schistes et grès stériles, qui peuvent également contenir des couches minces de houille.

Généralement, à la suite de ce dépôt hydrocarboné de lagune calme et

¹ Ce chiffre est naturellement distinct de celui donné plus haut pour la vente des produits après traitement industriel.

vaseuse, un changement de régime météorologique, correspondant avec un faible mouvement du sol, a amené des retours de formations torrentielles, à gros éléments. Des couches rubéfiées par leur dépôt sous un climat désertique et des dépôts gypseux ou salins lagunaires, en corrélation avec le même régime, ont souvent (mais sans qu'il faille donner à cette observation la rigueur d'une loi) succédé à ces grès, ou se sont intercalés au milieu d'eux.

Il faut ajouter que les couches de schistes bitumineux connues se présentent toutes dans des conditions tectoniques tranquilles et à peu près exemptes de plissement¹. Ce qui contribue à les localiser. Si des couches semblables avaient été violemment plissées, il est probable que, suivant une remarque précédemment faite à propos des combustibles, elles auraient perdu leurs matières volatiles pour aboutir peut-être finalement à des schistes graphiteux, ou au moins à des schistes à anthracite.

SCHISTES BITUMINEUX SILURIENS (ORDOVICIENS) DU CANADA

Whitney a décrit, dans le groupe ordovicien d'Utica, sur la rivière Hudson, certains pyroschistes à graptolites, dont il n'a pas craint d'attribuer la teneur en hydrocarbures à la décomposition de ces graptolites. Ce niveau, qui se retrouve sur le lac Huron, fait partie d'une transgression horizontale cambro-silurienne, superposée au plissement précambrien de la plate-forme canadienne. Au Canada, cet étage ordovicien, riche en grès, schistes et quartzites, affecte des caractères de dépôts littoraux dans des mers restreintes et semées d'îles, qui contrastent avec le développement contemporain des calcaires plus au Sud dans le Missouri et l'Illinois.

Pratiquement, ces pyroschistes ont une teneur médiocre en matières utiles : 23 p. 100 contre 77 p. 100 de schistes inertes. Sur ces 23 p. 100, il entre 15 de carbone, 1,60 d'hydrogène et 5,30 d'oxygène. Peut-être existe-il quelque rapport entre ces couches et les nappes pétrolifères à fragments organiques, dont la base se trouve au Canada à peu près au même niveau². Plus au Sud, dans la région pétrolifère de l'Ohio, des imprégnations hydrocarburées se trouvent jusque dans le calcaire de Trenton qui, stratigraphiquement, se place sous les schistes d'Utica.

SCHISTES BITUMINEUX DINANTIENS D'ÉCOSSE³

La série carbonifère renferme, à divers niveaux, des bogheads, ou même des schistes bitumineux, en même temps que des houilles. Nous allons étudier spécialement les terrains d'Écosse. Mais on rencontre également, à des niveaux un peu plus élevés, quelques terrains analogues en

¹ Voir plus loin, page 464, sur les plissements du bassin d'Autun.

² Voir plus loin, page 514, au chapitre du pétrole.

³ 1892. G. CHESNEAU. *Rapport sur l'industrie des huiles de schiste en France et en Angleterre* (Imp. nation., 36 p.). — 1898. REDWOOD. *L'huile minérale d'Écosse* (trad. de l'anglais en allemand par Singer, Leipzig, 368 p.). — 1901. M. CADELL. *Die Oel Schiefer Schottlands* (Z. f. pr. G., 1894, p. 360 ; 1900, p. 256 ; 1901, p. 116).

France : bogheads stéphaniens de Montrambert (Loire), de Commentry (Allier), naphtoschistes houillers de Bozon près de Fréjus (Var)¹.

La série des schistes bitumineux dinantiens d'Écosse, si importante industriellement, se présente en transgression concordante avec l'old red sandstone dévonien sur la chaîne calédonienne plissée, comme nous venons de voir ceux du Canada sur la chaîne huronienne, comme nous trouverons bientôt les schistes bitumineux de l'Europe centrale appartenant au permien inférieur en stratification horizontale sur le bord de la chaîne hercynienne. On y trouve les mêmes caractères lagunaires.

La coupe suivante montre la composition habituelle de ce dinantien écossais, qui peut avoir de 700 à 2 800 m., et la position des deux groupes de schistes bitumineux : le plus développé, celui du West Calder district, situé au-dessus du calcaire de Burdie House qui sert de repère stratigraphique ; le niveau restreint de Pumpherton, situé au contraire 180 m. plus bas.

6. **Millstone grit westphalien.**

5. **Terrain houiller inférieur** (*Lower coal measures* d'Écosse) renfermant les bassins houillers les plus productifs de l'Écosse, Lothian, Dalkeith, etc. On y trouve 17 couches de houille ayant souvent un toit marin, la couche de *Cannel coal*, dite Parrot-Coal, épaisse de 0^m,90 et les couches de minerai de fer (Blackband).

4. **Calcaire carbonifère** (*Mountain limestone*) à 720 m. au-dessus du calcaire de Burdiehouse.

3. **Schistes bitumineux du West Calder District.**

Schiste de Fells.
Marne.
Schiste de Broxburn,
Grès de Binny.
Intervalle de 150 m.
Schiste de Dunnet.
Schiste de Barracks.

2. **Calcaire de Burdie-House**, Camps ou Queensferry (formé d'ostracodes).

1. **Grès calcifères jaunâtres** (pierre de construction d'Edinburgh), avec veines de calcaire argileux (groupe de la pierre à ciment) et mélange de faunes marines, saumâtres et terrestres. Cet étage, qui a jusqu'à 1150 m. d'épaisseur, contient une cinquantaine de veines charbonneuses et, à 180 m sous le calcaire de Burdie-House, le niveau des *schistes bitumineux* de Pumpherton.

On remarque, sur cette coupe, que les schistes bitumineux se montrent en couches minces et régulières alternant avec des grès plus ou moins calcifères et accompagnées de nombreuses veines charbonneuses, dans un groupe sédimentaire, où se présentent simultanément, comme dans la plupart des autres bassins que nous aurons à étudier, des caractères terrestres et des caractères marins. C'est une formation lagunaire, où les conditions nécessaires pour le développement de l'huile minérale ont été particulièrement propices, puisqu'on arrive à une teneur moyenne en huile brute double de la teneur en France.

Les schistes inférieurs de Pumpherton sont plus riches que les autres

¹ Les mines de Bozon (Var) ont donné, en 1889, 5.400 tonnes de schistes ; en 1890, 2.700 tonnes. Ensuite elles ont été interrompues.

en produits ammoniacaux et l'on s'est demandé si cela ne tiendrait pas à une abondance spéciale des matières animales, tandis que les couches surtout hydrocarburées, comme celle de Broxburn (plus haut), résulteraient surtout de végétaux¹.

SCHISTES BITUMINEUX PERMIENS (AUMANCE, AUTUN, SAXE)

L'histoire de la chaîne hercynienne présente, dans la France centrale et le Sud de l'Allemagne, des caractères analogues. En France, nous voyons un mouvement orogénique, commencé pendant le dinantien, accentué pendant le westphalien, aboutir à la formation des lacs stéphanien à dépôt torrentiel hétérogène. Puis, pendant la première partie du permien (autunien), une sédimentation plus ordonnée, dans laquelle intervient l'action régulatrice des vagues marines, amène, sur la périphérie du Plateau Central, une série de dépôts présentant des caractères de transition entre les facies houillers qui se prolongent et les facies permien proprement dits, qui commencent, avec mélange des deux flores et apparition des *Walchia*. C'est notamment la phase où, sur le flanc Nord de la chaîne, dans une série de lagunes, se déposent les schistes bitumineux, bogheads et charbons du bassin de l'Aumance (Allier), du bassin de Bert et du bassin d'Autun. Partout ces couches présentent le même caractère de minceur et de régularité, qui contraste avec la disposition lenticulaire et les énormes conglomerats du stéphanien. En même temps, sur le bord Sud de la chaîne, se déposent les schistes à poissons de Lodève et de Decazeville.

La même époque est marquée : dans la Saxe, par le dépôt des couches de Lebach et de Cusel (grès et schistes avec minces couches de houille et rognons de fer carbonaté) ; en Saxe, par les Brandschisfer, ou schistes bitumineux de Weissig.

Il est à remarquer que les terrains associés aux schistes bitumineux contiennent fréquemment, eux aussi, des hydrocarbures, sous la forme de calcaires ou silex fétides. Des silicifications fréquentes se manifestent dans les terrains sous-jacents ou superposés, comme nous aurons l'occasion de le signaler à propos d'Autun et de Buxière. Elles se traduisent par la présence d'innombrables troncs de bois silicifiés et par des couches entières de silex. Il faut peut-être y voir l'effet d'une longue altération continentale, analogue à celle qui paraît avoir silicifié, dans le Plateau Central, le fond de tous les bassins houillers stéphanien, ou encore à celle qui a produit les meulière de Beauce dans le bassin parisien. Le dépôt des schistes bitumineux nous apparaît ainsi comme un épisode dans une phase de l'histoire géologique marquée par des alternances de conditions tour à tour continentales et lagunaires.

C'est le caractère qui continue généralement à s'accuser pendant la phase postérieure aux schistes bitumineux. Après leur dépôt, il se produit d'ordinaire, dans l'Europe centrale, un changement général des conditions de la sédimentation, accompagné d'un mouvement du sol qui détermine une dis-

¹ Nous avons donné, pages 455 et 456, les résultats pratiques obtenus par la distillation de ces produits.

cordance, à laquelle on n'a peut-être pas attaché toute l'importance qu'elle méritait. Partout on voit alors s'accumuler des grès rouges, qui marquent l'étage saxonien dans le Bourbonnais, à Blanzy et au Creusot, à Brive, dans les Vosges, dans la Sarre, en Saxe, etc. A ce rothliegende de caractère continental et désertique succède alors, plus localisée, dans le Mansfeld, la formation lagunaire des schistes bitumineux cuprifères (Thuringien). Après quoi, viennent d'autres produits lagunaires (cargneules, gypse, anhydrite, etc.).

La coupe du permien est ainsi la suivante :

- THURINGIEN. { Cargneules, gypse, anhydrite, etc..
 { Schistes cuprifères du Mansfeld.
- SAXONIEN. — Grès rouge du Bourbonnais, de Blanzy, du Creusot, des Vosges, de la Saxe, du rothliegende allemand.
- AUTUNIEN. — Schistes bitumineux et houilles de l'Aumance, de Bert (Allier), de l'Autunois. Schistes à poissons de Lodève et de Decazeville. Couches de Lebach et de Cusel dans la Sarre. Schistes bitumineux de Weissig en Saxe.

Nous allons étudier cette formation en suivant la longueur de la chaîne de l'Ouest à l'Est.

Bassin de l'Aumance (Allier)¹. — Le terrain permien de Buxière, situé dans le département de l'Allier, au Nord du Plateau central, s'est déposé dans deux estuaires allongés, séparés par une chaîne gneissique et encaissés entre des roches primitives : estuaires grossièrement parallèles à l'allongement du bassin d'Autun, c'est-à-dire à la direction générale des accidents du Morvan.

Il commence, à la base, par l'étage des schistes bitumineux, très analogue encore au stéphanien par sa flore aussi bien que par ses caractères minéralogiques, mais beaucoup plus régulièrement stratifié. Là on trouve des grès rouillés avec des schistes noirâtres, un niveau de houille presque immédiatement surmonté par des schistes bitumineux exploités et, à la partie supérieure, des grès et schistes noirâtres avec des bancs de silix noirs et des calcaires fétides très caractéristiques.

Au-dessus, commence l'étage des grès de Bourbon formé de grès blancs avec argiles bariolées rouges et vertes, où l'on rencontre seulement un lit très mince de schistes bitumineux flexibles et l'on arrive, après une discordance, à l'étage des grès rouges, très peu développé dans cette région.

Les silix de l'étage des schistes bitumineux sont souvent riches en débris de plantes ; on trouve, en outre, dans les schistes eux-mêmes, de

¹ Coll. Ecole des Mines, 1829. — Gisements visités de 1885 à 1900. — 1870. JAFFRE (Jules). *Recherches sur les huiles minérales de Bruzière* (B. S. G. F., t. 19, n° 12). — 1888. DE LAUNAY. *Terrain permien de l'Allier* (B. S. G. F., 3^e série, t. 16, p. 298). — 1888. DE LAUNAY. *Schistes bitumineux de Buxière* (Revue scientifique du Bourbonnais). — 1888. DE LAUNAY. *Réunion extraordinaire de la Société géologique dans l'Allier et feuille de Moulins au 1/80.000^e*. — 1893. SAUVAGE. *Poissons du permien de l'Allier* (B. S. G. F., 3^e série, t. 20, p. 270).

très nombreux poissons : *Onchus simplex*, *Hybodus*, *Diplodus*, *Achanotodes*, *Conchopoma*, *Elonichtys*, *Amblypterus Delessei* et, dans des grès au voisinage de Souvigny, des fragments de reptiles comparables à l'*Actinodon Frossardi*.

Les *travaux d'exploitation* portent sur les deux centres principaux de Buxière, à l'Ouest et de Saint-Hilaire, à l'Est. La coupe des schistes exploités est la suivante :

A BUXIÈRE

Grosse couche	0,78	} 2,65 m.
Stérile	0,37	
Schistes bitumineux	0,17	
Grès schisteux	0,60	
Schiste stérile	0,18	
Couche riche en poissons	0,18	

A SAINT-HILAIRE

Schiste feuilleté (dit les <i>Colles</i>)	0,15	} 1,80 m.
Gros banc (dit le <i>Méchant</i>)	0,80	
Banc avec écailles de poissons	0,20	
Banc (dit la <i>Riffle</i>)	0,35	
Havage (matières stériles)	0,30	

D'un point de vue théorique, on peut remarquer que les poissons sont tout particulièrement abondants dans une couche inférieure trop pauvre en bitume pour être exploitée, tandis qu'on n'en trouve guère que des écailles disséminées dans les schistes utilisables.

La distillation se fait dans trois usines, savoir : celles des Plamores pour les concessions des Plamores et de la Sarcelière; celle des Justices pour les concessions de Buxière et de la Courolle; celle de Saint-Hilaire pour Saint-Hilaire.

Le rendement en huile brute varie, comme nous l'avons dit, entre 5 et 7 p. 100 (en volume).

Bassin d'Autun (Saône-et-Loire)¹. — Le bassin houiller et permien d'Autun a grossièrement la forme d'un triangle irrégulier, dont la base serait une ligne de 32 km. de long allant d'Epinac par Autun à Verrière et dont le sommet serait situé près d'Igornay (la hauteur ayant environ

¹ Coll. Ecole des Mines, 1727. — 1841. ELIE DE BEAUMONT et DUFRÉNOY. *Explication de la carte géologique de la France*, t. I, p. 669 à 683. — 1844. MANÈS. *Mémoire sur les bassins houillers de Saône-et-Loire*. — 1847. MANÈS. *Statistique minéralogique du département de Saône-et-Loire*. — 1848. VIRLET D'Aoust. *Remarques sur les schistes bitumineux d'Autun* (B. S. G. F., 2^e, t. 5, p. 369). — 1850. LORIERE. *Les schistes bitumineux d'Autun classés dans le houiller* (B. S. G. F., 2^e, t. 8, p. 144). — 1867. SIMONIN. *Industrie der Mineral Oele in Frankreich* (Mon. scient., 1867, p. 599; London Chemical News, 1867, p. 313). — 1868. TOURNAIRE. *De l'industrie des huiles de schiste dans l'Autunois* (Ann. d. M., 6^e, t. 20, p. 429). — 1868. CHOSSON. *De la situation de l'industrie des schistes bitumineux du bassin d'Autun* (Ann. d. M., 6^e, t. 20, p. 347). — 1880. AYMARD. *Soc. ind. min.*, p. 171. — 1881-83. *Feuilles au 1/80.000^e d'Autun et Château-Chinon*, par MICHEL LÉVY et DELAFOND. — 1890. MICHEL LÉVY, DELAFOND, ZEILLER et RENAULT. *Bassin houiller et permien d'Autun et d'Epinac* (Imp. nat.). — 1892. CHESNEAU. *L'industrie des huiles de schiste en France et en Angleterre* (Imp. nat.).

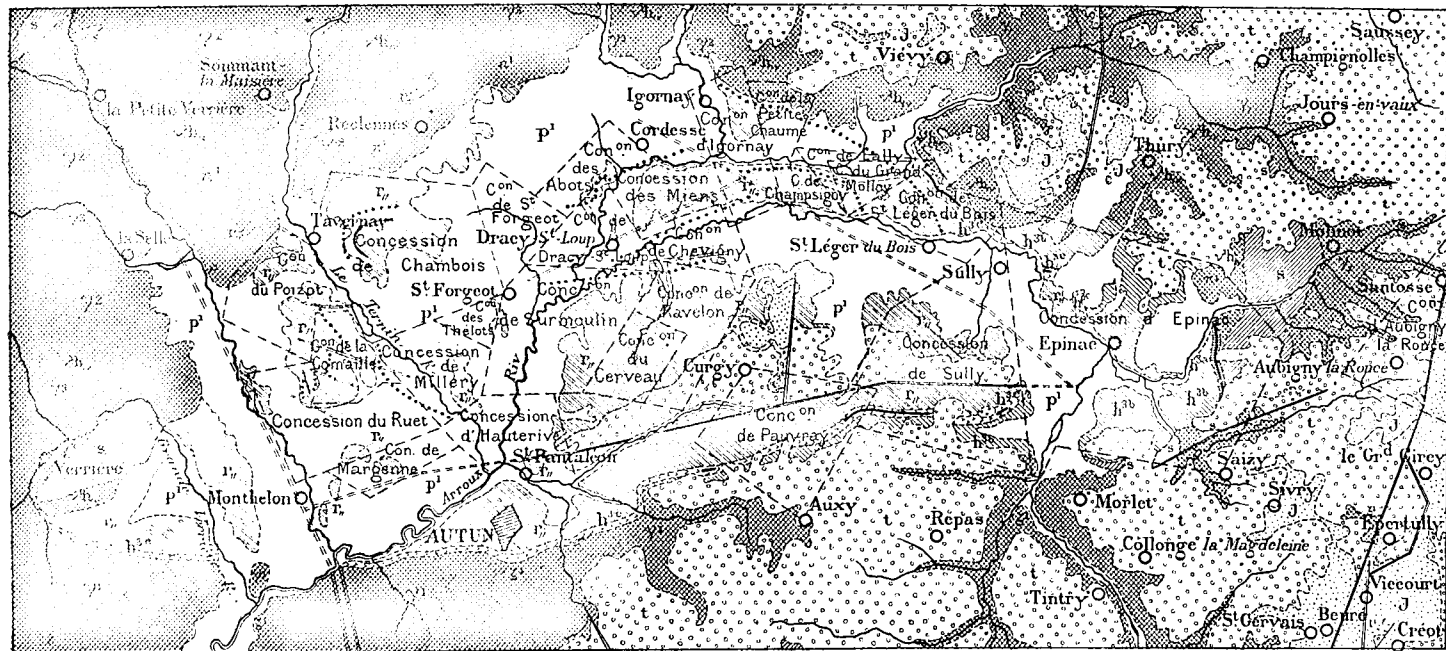


Fig. 58. — Carte géologique du bassin de schistes bitumineux d'Autun (d'après Delafond).

10 km). La superficie totale est approximativement de 246 km² (fig. 58).

Le bassin est complètement fermé par une ceinture de terrains anciens, au milieu desquels il forme une vaste dépression assez plate.

Ces terrains sont, sur presque toute la bordure Nord, des orthophyres et tufs orthophyriques du Culm, auxquels sont associés, au Nord-Ouest, vers Tavernay, quelques gîtes de charbons anthraciteux. A l'Ouest, apparaît en outre, vers la Selle, un massif de granulite à deux micas percé de microgranulite. Sur la bordure Sud, on trouve : à l'Ouest d'Autun, de la granulite ; à l'Est, des gneiss plus ou moins granulitisés.

Toute cette cuvette ancienne semble avoir, pendant le dépôt du houiller et du permien, subi un approfondissement progressif, une accentuation de son allure première (d'abord en se creusant, puis en se rétrécissant), analogue à celle que l'on peut observer dans la plupart des bassins houillers du Plateau central et que laissent également supposer tous les grands bassins lacustres étrangers du Karoo, du Gondwana, etc.

Postérieurement à sa formation et même à celle du permien, d'autres mouvements, continués toujours dans le même sens, ont eu pour effet d'y produire de larges plissements et des étirements, comme si ces couches s'étaient moulées sous pression sur les roches anciennes, tandis que les formations plus superficielles du permien subissaient de grandes cassures et des failles.

La coupe des terrains représentés est la suivante :

1° Le *houiller* est formé de trois étages ayant débordé par transgressivité l'un sur l'autre :

A. L'étage inférieur, assez ancien (intermédiaire entre les couches de Rive-de-Gier et celles de Saint-Etienne) ayant fourni la houille d'Épinac et localisé à l'Est du bassin ;

B. L'étage moyen stérile des grès et poudingues avançant un peu plus vers l'Ouest ;

C. L'étage supérieur peu épais du Molloy correspondant à la partie tout à fait supérieure du houiller (étage des Calamodendrées de la Loire). très discordant avec le précédent et représenté jusque dans le Sud-Ouest du bassin.

2° Le *permien* d'Autun présente deux subdivisions principales, dont la première est de beaucoup la plus développée : les schistes bitumineux et les grès rouges. Les schistes bitumineux comprennent eux-même trois étages :

A. *L'étage inférieur ou étage d'Igornay-Lally* (du nom de deux concessions au Nord-Est) est déjà assez nettement permien par sa faune, ses calcaires magnésiens et ses épaisses couches de schistes bitumineux ; mais sa flore renferme encore, pour la plus grande partie, des espèces houillères et l'apparition des *Callipteris* seule lui donne une tendance permienne.

A la base, est une formation schisteuse, qui a environ 75 m. d'épaisseur et renferme trois bancs bitumineux exploités, fournissant une huile moins lourde (0,855 en moyenne) que celle des autres niveaux. A Igornay, ces couches ont :

La supérieure : 3 m. d'épaisseur avec un rendement en huile brute de 4,50 p. 100 en volume¹ ;

La couche n° 2 (séparée de la précédente par 2 m. 50 de stérile) : 1 m. 80 d'épaisseur, rendement 4,25 p. 100.

La couche n° 3 (séparée de la précédente par 3 m. 50 de stérile) : 7 m. d'épaisseur, dont 2 m. 50 exploités ; rendement 3,75 p. 100.

On trouve, associés à ces schistes, des calcaires magnésiens contenant parfois de petites coquilles d'eau douce. La faune d'Igornay, a fourni de nombreux poissons et reptiles : *Paleoniscus Blainvillei* ; *Megapleuron Rochei* ; *Pleurachantus Frossardi* ; *Achantodes* ; *Actinodon Frossardi* ; *Euchirosaurus Rochei* ; *Stereoachis dominans* ; *Protriton Petrolei*, etc.

Au-dessus de ces schistes de la base et séparée d'eux par des grès et poudingues, est une autre petite couche de schistes, utilisée jadis à Lally et à Champsigny.

On exploite à cet étage les concessions d'Igornay, Lally, Saint-Léger-du-Bois.

B. L'étage moyen, ou de la Comaille-Chambois, est une importante formation de grès, comprenant à sa base la couche de schistes bitumineux la plus importante de l'Autunois, dite « grande couche » et, dans les parties moyenne et supérieure, diverses petites couches de schistes bitumineux et une couche de houille.

La flore de cet étage est nettement permienne. On y rencontre une grande abondance de bois silicifiés et on y a trouvé également, au milieu d'une faune très riche analogue à celle de l'étage inférieur, le premier mollusque terrestre signalé dans les terrains houillers ou permien d'Europe : *Pupa Walchiarum* (Fischer).

La composition de la grande couche est la suivante à la Comaille :

Schistes bitumineux (Banc du toit appelé <i>couronne</i>)	0 ^m ,70. — Rendement : 4,5 à 5 p. 100.
Barre blanche argileuse	0 ^m ,03.
Schistes bitumineux (Banc dit <i>banc carré</i>)	0 ^m ,27. — Rendement : 8,5 à 9 p. 100.
Barre blanche argileuse	0 ^m ,01.
Schistes bitumineux (Banc dit de <i>demi-couronne</i>)	0 ^m ,65. — Rendement : 6,5 à 7,5 p. 100.
Barre blanche argileuse	0 ^m ,01.
Schistes bitumineux (Banc dit <i>banc de pied</i>)	0 ^m ,75. — Rendement : 5,5 à 6 p. 100.
Banc de havage (schistes stériles)	0 ^m ,10.

100 kg. de minerai de la grande couche donnent, paraît-il, 17 à 18 m³ de gaz d'éclairage comparable au gaz de houille.

Les concessions exploitées à cet étage sont celles du Ruet, de la Comaille, du Poisot, de Dracy-Saint-Loup, Les Abots, Saint-Forgeot, Chévi-gny, Ravelon, etc...

C. L'étage supérieur, ou de Millery, essentiellement schisteux, renferme de nombreuses petites couches de schistes bitumineux et une couche

¹ Soit 45 litres d'huile brute par mètre cube de minerai chargé en cornue.

de boghead exploitée. Cet étage est encore plus riche que le précédent en bois silicifiés (Champs de la Justice et des Borgis).

La couche de boghead, qui a environ 0^m,25 d'épaisseur, est exclusivement employée à la fabrication du gaz d'éclairage. La densité varie de 1,30 à 1,44 ; la teneur en cendre est comprise entre 35 et 48 p. 100. Ce boghead, dépouillé de ses cendres, renferme 80 p. 100 de carbone, 10 d'hydrogène et 10 d'oxygène et azote. Un mètre cube de boghead donne, par la distillation, 480 à 500 m³ de gaz ayant un pouvoir éclairant égal à deux fois au moins celui du gaz de houille.

On exploite, au contact du boghead, quelques schistes bitumineux.

Les concessions situées sur cet étage sont : Millery, les Thélots, Surmoulin, Hauterive, etc...

Enfin les schistes bitumineux sont recouverts en discordance, du côté de Curgy, au centre du bassin, par les grès rouges.

D'un point de vue industriel, les schistes bitumineux de ce bassin n'ont été jusqu'ici exploités que par des travaux superficiels dont la profondeur ne dépasse pas 60 m. Nous avons donné précédemment la production de ces dernières années.

Saxe, Bohême et Mansfeld. — Le même étage Artinskien-Autunien, qui renferme les schistes bitumineux de l'Allier et de Saône-et-Loire, présente en Saxe, à *Weissig*, des terrains analogues, dits Brandschiefer, qui offrent, comme en France, un mélange de plantes stéphanienues et permienues¹. La même transition se retrouve, avec des terrains analogues, en Bohême, dans les bassins de *Pilsen* et de *Kladno-Rakonitz*.

Au-dessus de cet étage viennent les grès rouges du Rothliegende, auxquels se superposent, un peu plus au Nord, les schistes bitumineux cuprifères du *Mansfeld*, dont nous renvoyons la description au chapitre du cuivre.

SCHISTES BITUMINEUX LIASIQUES

Certaines des conditions qui avaient amené le développement des schistes bitumineux permienus paraissent s'être renouvelées, avec une grande extension, mais sans forte concentration hydrocarbonnée, pendant l'époque liasique. Tantôt ce sont de simples couches à empreintes de poissons, que l'on peut suivre dans le toarcien, de la Lozère à l'Avalonnais, au Cher (Saint-Amand²), à la Meurthe et à l'Angleterre. Tantôt, comme dans le Wurtemberg et le Banat, l'on passe à de véritables naphtoschistes, susceptibles d'un emploi.

Les schistes bitumineux liasiques de France sont inexploités. Cependant Elie de Beaumont avait émis l'opinion qu'on pourrait utiliser quelques-uns d'entre eux comme ceux du permien. A *Châtillon*, près de Besançon, et aux environs de Vesoul, on en a employé comme engrais à cause d'une certaine proportion d'acide phosphorique et de potasse qu'ils contiennent.

¹ Il ne faut pas confondre ces couches avec les lignites bitumineuses de Weissenfels, dont il sera question plus loin page 468.

² 1880. DAGINCOURT, B. S. G. F., 3^e série, t. 8, p. 355.

Le toarcien de l'Avalonnais, à *Thisy*, présente des schistes bitumineux à posidonies tenant 2 à 3 p. 100 d'huile minérale, avec des vertèbres de sauriens. Celui de Souabe contient les schistes bitumineux à posidonies de *Boll*.

Des schistes bitumineux liasiques se retrouvent en abondance près de *Reutlingen*, dans le Wurtemberg, où on les exploite pour les distiller. L'analyse de ces schistes a donné :

Al ² O ³	Fe ² O ³	Ca O	Mg O	Na ² O+K ² O	SO ³	SiO ²	CO ²	C	H	Ph ² O ⁵
6,848	7,294	16,224	0,957	5,750	27,02	6,869	14,88	10,5	2,2	0,54

On connaît des schistes semblables dans le Banat, près *Steierdorf*, où l'on a essayé un moment vers 1880 de les exploiter et là encore c'est le même niveau à posidonies, surmonté de couches à charbon.

Dans des conditions plus discutables, les schistes à posidonies calloviens de l'*Isère* renferment une « fontaine ardente » à gaz carburés dans la vallée de la Gresse, affluent du Drac.

On peut signaler aussi dans le Bugey, en face Seyssel, les terrains bitumineux Kimeridgiens d'*Orbagnoux*, riches en plantes et poissons, pour lesquels une origine adventive est également possible¹.

De même enfin le cénomanien de l'Ardèche renferme à *Vagnas* des schistes bitumineux.

SCHISTES BITUMINEUX TERTIAIRES DE MENAT (PUY-DE-DÔME)²

Dans le *tertiaire*, nous nous contenterons d'étudier les schistes de *Menat* (Puy-de-Dôme).

Il existe, à Menat (Puy-de-Dôme), une dépression circulaire d'environ un kilomètre de diamètre située au milieu des micaschistes, à une grande distance du tertiaire de la Limagne et remplie par des dépôts sannaisiens bien connus des géologues pour la flore et la faune qu'on y a rencontrées.

Ces dépôts, qui semblent résulter du remplissage indépendant d'un petit lac restreint, débutent par un conglomérat de micaschistes à ciment argileux, au-dessus duquel viennent les schistes exploités.

Ces schistes brun noirâtre, qui se divisent en feuillets extrêmement minces dès qu'on les expose à l'air, sont tendres et à grain fin. Leur composition est la suivante :

Cendres	62,35
Eau ammoniacale	9,00
Huiles brutes et produits solides	5,00
Gaz et matières non condensées	11,30
Charbon	12,35

¹ Voir plus loin p. 522.

² Coll. Ecol. des Mines, 1830. — Gisements visités depuis 1885. — 1829. LECOQ. *Description géologique du bassin de Menat en Auvergne*. — 1850. BOURJOT. *Sur les schistes bitumineux de Menat* (B. S. G. F., 2^e, t. 8, p. 39). — 1867. LECOQ. *Epoques géologiques de l'Auvergne*, t. 5, p. 430. — 1868. D'ARCHIAC. *Paléontologie de la France*, p. 306. — L. DE LAUNAY, 1888. *Réunion de la Société géologique dans l'Allier* (B. S. G. F., p. 1072) ; 1896. *Feuille de Gannat au 1/80.000^e* ; 1908. (la Nature, 23 mai). — A. LAURENT. *Travaux botaniques divers*.

Le schiste, qui prend feu spontanément, donne, lorsqu'on le calcine en cornues, du noir utilisé pour les mêmes emplois que le noir animal (peinture, etc.).

En le chauffant à l'air libre, on obtient, au contraire, des cendres essentiellement formées de silice soluble dans la potasse, qui sont vendues sous le nom de *tripoli*.

Il est certain qu'il s'est produit, dans ce petit bassin, une accumulation de matières organiques, feuilles, infusoires et poissons, qui peut suffire pour expliquer la proportion des carbures emmagasinés dans ces terrains. Ces restes se présentent souvent avec un degré de conservation remarquable jusqu'au moment où une exposition à l'air amène le fendillement des schistes; et il n'est pas rare de trouver, non des empreintes de feuilles, mais des feuilles se détachant du schiste avec leur tissu encore presque intact. Par contre, les animaux dont on retrouve les restes nombreux, sont presque tous pyritisés.

L'extraction annuelle est (1907) d'un millier de tonnes de schistes.

LIGNITES BITUMINEUX (PYROPISSITES) DE WEISSENFELS EN SAXE

Beaucoup de lignites, et même de tourbes, contiennent une quantité notable de paraffine. La formation lignitifère (oligocène) de Weissenfels et Zeitz, en Saxe est, à cet égard, tout particulièrement privilégiée : ce qui a amené, depuis un demi-siècle, la constitution d'une importante industrie locale.

Weissenfels est situé à 30 km. S. W. de Leipzig sur la Saale. La principale fabrique est la « Riebeck'sche Montan Fabrik » qui, dans ses deux usines de Webau et de Reussen, peut traiter par an 20 à 25.000 t. d'huile brute. Le total, pour tout le district, est de 60.000 t. d'huile brute.

La couche de lignite, épaisse de 18 à 20 m., est formée d'une matière peu consistante, pulvérulente quand elle est sèche, d'une couleur jaunâtre et ressemblant à du bois pourri plutôt qu'à du lignite proprement dit. Son extraction se fait très facilement par petits puits de quelques mètres de profondeur, ou par gradins à ciel ouvert. La partie supérieure, la plus riche, sur 4 m. d'épaisseur, rend à la distillation, 6 à 7 p. 100 d'huile brute (theer), la partie inférieure 3 p. 100. Le prix de revient de l'huile brute est de 75 à 100 fr. la tonne.

Cette huile brute, de densité 870, est tellement riche en paraffine qu'elle est solide à la température ordinaire. On la distille dans le vide pour obtenir : 30 p. 100 d'huile brute à 860 destinée à être rectifiée, 55 p. 100 d'huile paraffinée d'où l'on extrait ensuite 15 à 20 p. 100 de paraffine et 15 p. 100 de résidu lourd. L'huile à gaz se vend à l'usine 125 à 150 fr. la tonne, l'huile d'éclairage 200 à 220, la paraffine 250 à 375.

III à VII. — PÉTROLES. OZOCÉRITES. BITUMES. ASPHALTES GAZ NATURELS.

Les substances diverses, que nous rapprochons ici du pétrole, nous paraissent, quoique très différentes d'aspect et même de composition, avoir une même origine. Pour nous, les bitumes et les asphaltes sont des dérivés superficiels, produits par la remise en mouvement de formations pétrolifères plus profondes et les gaz naturels sont le dégagement de matières volatiles associées à ces mêmes pétroles.

Si l'on arrivait à montrer que les pétroles eux-mêmes sont produits par la distillation souterraine de schistes bitumineux, conclusion très discutable qui offre néanmoins certaines vraisemblances, on aurait une chaîne presque continue des divers composés hydrocarbonés.

Le rapprochement qui, théoriquement, nous est ainsi suggéré, présente une grande importance pratique, puisqu'il met en évidence des caractères superficiels pouvant donner lieu avec succès à la recherche du pétrole par sondages profonds. Il correspond avec une idée, que nous développerons plus loin, sur l'origine commune de bien des nappes pétrolifères superposées, à des niveaux géologiques différents, dans un même bassin. Nous dirons, en parlant de l'origine du pétrole, que ce corps nous semble s'être déposé *anciennement*, sous une forme quelconque, par des phénomènes *terminés*, dus selon toute vraisemblance à des accumulations de matières organiques, dans un certain nombre de strates analogues à des couches de houille : strates, à partir desquelles une remise en mouvement habituelle, due à sa distillation facile et à son extrême mobilité, l'a fait monter dans une série de bancs poreux superposés au dépôt primitif. C'est dans ces bancs poreux que nous allons très souvent le chercher par nos exploitations. Plus ces couches pétrolifères, adventives ou originelles, se sont trouvées près de la superficie actuelle, plus, par les communications établies avec celle-ci, elles ont perdu de leur pétrole en épanchements superficiels, qui trahissent leur présence au jour, mais qui les appauvrissent et plus, d'autre part, une altération s'est produite, tant sur ces épanchements que sur ces couches elles-mêmes. Le caractère ordinaire de ces altérations est une combustion de l'hydrogène, qui a amené la formation de corps de plus en plus carburés, avec accroissement corrélatif de la densité¹. On trouve ainsi, en se rapprochant de la surface, des huiles de plus en plus lourdes, qui aboutissent à des ozocérites, à des bitumes, ou, si l'imprégnation a porté sur des calcaires poreux, à des asphaltes. En même temps, des dégagements gazeux peuvent annoncer la présence de pétroles profonds, sans qu'il y ait rapport nécessaire entre l'abondance des uns et celle des autres.

Evidemment, des hydrocarbures d'autre origine, et notamment ceux qui se dégagent des fumerolles volcaniques, ont pu déterminer des formations bitumineuses analogues. Nous croyons néanmoins qu'on aurait tort d'exagérer cette part du volcanisme et l'expérience de très nombreux

¹ Parfois aussi il parait y avoir eu introduction de soufre par la réduction de sulfates.

districts pétrolifères, qui vont être étudiés, montre qu'on est fréquemment arrivé au pétrole en partant de ces produits altérés sans rencontrer la moindre indication d'une éruptivité quelconque (Bakou, Boryslaw, Pechelbronn, etc.

Nous signalerons donc, à l'occasion du pétrole, les principaux gisements de bitume, ozocérites, gaz naturels, etc., qu'il n'y a pas lieu d'envisager séparément. Néanmoins, comme les applications pratiques et le mode d'application sont différents pour ces substances, la description de quelques gisements types sera donnée, plus en détail, pour chacune d'elles, dans des sous-chapitres distincts.

III. — PÉTROLES¹

a) NATURE ET PROPRIÉTÉS

Composition chimique. — Les pétroles, très différents suivant leur point d'origine, sont tous essentiellement formés d'hydrocarbures nombreux

¹ La question du pétrole est une de celles sur lesquelles la bibliographie est la plus abondante et la plus documentée. En dehors de nombreux périodiques spécialement consacrés à cette substance dans les grandes régions pétrolifères, il suffit de citer les ouvrages d'ensemble comme celui de Tassart en français, d'Engler et Høfer en allemand, de Crew en anglais, tous très volumineux, dont on trouvera plus loin la bibliographie. Ne pouvant donner ici qu'un très bref résumé de la question, nous avons seulement cherché à mettre en évidence les faits les plus intéressants pour la théorie du pétrole et, par conséquent, pour sa recherche.

Voir, comme généralités sur le pétrole :

1869. BERTHELOT. *Méthode universelle pour réduire et saturer d'hydrogène les composés organiques* (B. S. C. P., t. 11, p. 278). — 1869. SAINTE-CLAIRE-DEVILLE. *Sur les propriétés physiques et le pouvoir calorifique des pétroles et des huiles minérales* (C. R., t. 18, p. 349 et 485). — 1870. BERTHELOT. *Recherches sur les états du carbone* (Ann. Ch. et Ph. (4), t. 19, p. 396). — 1871. NAUMANN. *Erdöl und Asphalt* (Elemente der Mineralogie). — 1871. BYASSOU. *Sur l'origine du pétrole* (C. R., t. 63, p. 609; J. C. S., t. 24, p. 1024; London chemical News, 1871, p. 167; Monit. scient., 1871, p. 264). — 1872. ANDERSON. *On the origin of petroleum* (Journ. of the Society of art., p. 501). — 1877. MENDELEFF. *Sur l'origine du pétrole* (B. S. C. P., t. I, p. 501; B. de G., 1877, p. 229; Deutz. Indust. Zeit., 1877, p. 115; Ind. B., 1877, p. 251; W. B., 1877, p. 1037; Revue scient., de la France et de l'étranger, 2^e série, 7^e année, p. 409). — 1878. RUSSEL. *On the occurrence of a solid hydrocarbon in the eruptive rocks of New-Jersey* (Am. J. of Sc. (3), t. 16, p. 412). — 1878. PENRIVAL. *On « indurated bitumen » incavities of the trap of the Connecticut valley* (Am. J. of Sc., t. 16, p. 130). — 1880. ASHBURNER. *Petroleum* (Am. J. of Sc. (3), t. 19, p. 468). — 1884. ACH. SIX. *Les hydrocarbures naturels de la série du pétrole* (Ann. Soc. géol. du Nord, t. 11, p. 334. Lille. — 1887. CREW. *Practical Treatise of Petroleum* (London, Sampson Low). — 1891. H. DEUTSCH. *Le Pétrole et ses applications* (1 vol. in-8^e, Quantin). — 1894. OPPERMAN, HUMBERT, LODIN. *Sur les dégagements de gaz inflammables survenus dans des carrières souterraines d'argile plastique, dans des mines métalliques* (Pontpean) (Ann. d. M. 9^e, t. 8, p. 1 à 40). — 1895. JACCARD. *Le pétrole, l'asphalte et le bitume* (Alcan, 292 p.). — 1896. GARVEY. *Ueber den Stickstoffgehalt des Bitumens in seiner Beziehung zur Frage der Bildung des Erdöls* (Thèse — C. R. Z. f. pr. G., 1896, p. 163). — 1896. OSCHENIUS. *Die Bildung des Erdöls* (Z. f. pr. G., 219). — 1896. BELA MIKO VON BÖLÖNY. *Zur Frage der Genesis des Petroleums* (C. R. Z. f. p. G., p. 470). — 1897. PHILLIPS. *Sur la prés. du pétrole dans les cavités des fossiles* (C. R. Z. f. pr. G., 1898, 334). — 1898. *Acide carbonique dans les filons pyrileux à pyrile crépitante au Colorado* (Z. f. pr. G., 341). — 1898. OSCHENIUS. *Methan, Bitumen, Asphalt, Anthracit, Graphit, Diamant* (Z. f. pr. G., 153). — 1898. RUP.

appartenant aux séries du formène, de l'éthylène, de l'acétylène, etc., dont la proportion varie suivant le point de provenance, mais dont, quoi qu'on en ait dit, la présence, en plus ou moins grande quantité, est à peu près constante dans tous les districts, en sorte qu'il nous paraît impossible de distinguer les pétroles, d'après leur composition chimique, entre les deux origines organique et minérale. Ces hydrocarbures forment des séries complexes, dont les éléments peuvent passer de l'un à l'autre par des réactions diverses, que le métamorphisme a permises.

Les modifications, ainsi subies par un pétrole depuis sa formation première (qui elle-même a dû résulter d'une fermentation organique accomplie dans des circonstances variables, pendant un temps plus ou moins long), ont finalement produit les pétroles bruts, avec des diversités telles qu'on peut presque reconnaître l'origine d'un pétrole par son analyse. Sans entrer dans les détails de cette étude chimique, nous en retiendrons seulement ce qui est le plus intéressant, soit pour les théories géologiques, soit pour les applications pratiques.

Géologiquement, si l'on compare entre eux les deux principaux groupes pétrolifères du monde, on aperçoit aussitôt, dans leur composition chimique, un contraste, sur lequel on a peut-être trop insisté pour en conclure leur origine différente, mais qui n'en est pas moins caractéristique.

Ainsi, les *pétroles de Pennsylvanie* contiennent à peu près tous les *carbures saturés* ou forméniques, homologues supérieurs du méthane ou gaz des marais, de formule générale $C^n H^{2n+2}$, depuis le butane jusqu'au pentatricontane, avec quelques carbures non saturés, plus récemment reconnus par Mabery, y compris des termes $C^n H^{2n}$ de la série éthylénique (gaz oléfiant ou bicarbonate d'hydrogène), souvent regardés comme propres aux pétroles du Caucase, et des carbures cycliques $C^n H^{2n-2}$. Les *pétroles du Caucase* sont, au contraire, formés en grande partie par des *carbures non saturés*, naphténiques ou cyclopolyméthyléniques. Il serait néanmoins, tout à fait inexact, à notre avis, d'établir une différence d'origine entre les pétroles non saturés du type caucasique, considérés comme d'origine volcanique parce qu'on n'a pas encore pu les reproduire en partant de corps organisés, et les carbures saturés du type pennsylvanien, réputés d'origine sédimentaire par la

ZUBER. *Die modernen Petroleum Entstehungs Hypothesen* (Z. f. pr. G., p. 84-96). — 1899. STAHL. *Zur Theorie der Naphtabildung* (Chem. Ztg., n° 15, p. 144). — 1899. STELLA (AUG.). *A proposito di genesi dei giacimenti di Petrolio* (Ras. Min., t. 11, Torino, 5 p.). — 1900. ANGERMANN (CL.). *Die allg. Naphtageologie* (Wien. Hans Urban, 97 p.). — 1900. HÖFER. *Zur Geologie des Erdöles* (Congrès petrol. de Paris, OEst. Z.). — 1901. FISCHER. *Die chem. Techn. der Brennstoffe* (Braunschweig, Vieweg, 379 p.). — 1901. KLEMENT. *Les théories relatives à l'origine du pétrole* (J. du Pétrole, 1901 et 1902). — 1902. KÜSPERT. *Die Entstehung des Erdöls und seine künstliche Darstellung* (Grazer Montan Ztg., p. 560-561). — 1908. L. C. TASSART. *Exploitation du pétrole* (4 vol. in-4°, Dunod). Cet ouvrage donne un résumé particulièrement complet, et mis au courant de toutes les questions concernant le pétrole. — 1908. L. DE LAUNAY. *L'origine du pétrole* (La Nature n° 1815, 7 mars). — 1909. C. ENGLER et H. HÖFER. *Das Erdöl., seine Physik, Chemie, Geologie, Technologie und sein Wirtschaftsbetrieb* (Leipzig). — Voir la bibliographie ancienne dans le *Pennsylvania geol. survey*, 1886. 2° partie. — Consulter également les comptes rendus des divers congrès internationaux du pétrole, les Revues périodiques, telles que : Naphta : Pétroles, mines, industrie (Bukarest) ; Moniteur du pétrole roumain ; Petroleum (Berlin) ; The Petroleum Review (London) ; Oil investor journal (Amérique), etc.

majeure partie des géologues américains et, en effet, reproduits par C. Engler en distillant des huiles animales. La différence, qui semble si frappante quand on envisage seulement ces deux termes extrêmes, disparaît quand on considère les termes intermédiaires comme ceux des Carpathes et l'on a alors, au contraire, l'impression d'une chaîne continue. L'expérience négative pour la synthèse des carbures non saturés ne prouve rien : et, je viens de remarquer que, dans le pétrole pennsylvanien, entraînent accessoirement des carbures du type caucasique. Les parties de pétrole américain distillant à de hautes températures contiennent même probablement des carbures encore moins riches en hydrogène, qui se détruisent par la décomposition.

D'autre part, dans les très intéressantes expériences de Sabatier et Senderens, en faisant réagir vers 200°, sur du nickel réduit, de l'acétylène et de l'hydrogène, ou de l'acétylène seul, on obtient toute une série de liquides hydrocarbonés, qui peuvent, en variant légèrement les conditions de l'expérience, ressembler : soit à du pétrole américain quand l'hydrogène est en grand excès ; soit à du pétrole caucasique quand l'acétylène est presque seul ; soit enfin à des pétroles de Galicie et de Roumanie dans les cas intermédiaires.

L'enseignement apporté par la chimie aux théories géologiques se borne donc à nous apprendre que des hydrocarbures analogues aux pétroles (et probablement à tous les pétroles) peuvent être produits par deux voies opposées, entre lesquelles la chimie seule ne permet pas de choisir ; soit : 1° par réaction à chaud de la vapeur d'eau sur des carbures alcalins (Berthelot, 1866), ou sur des carbures métalliques pouvant, avec des métaux différents, donner acétylène, méthane, étylène, etc. (Moissan, 1892), ou par la méthode Sabatier (1906) ; soit : 2° par la distillation en vase clos de matières organiques putréfiées (Cahours, 1875 ; C. Engler, etc.), avec cette seule restriction sans grande importance théorique que les produits obtenus par cette seconde méthode sont, jusqu'ici, un peu moins complets. La température de 200 à 300° au plus, nécessitée par les expériences de chimie minérale, ne doit pas, de son côté, être considérée comme une objection. Cela correspond au polymorphisme bien connu des hydrocarbures, qui existent, d'une part, dans toute la série organisée et qui, d'autre part, sont constamment produits par les fumerolles volcaniques, où leur combustion donne de l'acide carbonique, ou même par la seule distillation des roches cristallines, qui en renferment toujours de faibles traces¹.

Nous avons donné plus haut² la composition élémentaire de quelques pétroles pris pour types. Nous n'y revenons pas.

Pratiquement, les différences chimiques les plus importantes entre les pétroles, sont celles qui se traduisent par les proportions diverses d'huile lampante et de paraffine³ et qui entraînent, en même temps, des variations dans la densité.

¹ On a récemment reconnu l'influence probable des rayons ultra-violet dans la production de composés hydrocarbonés binaires ou ternaires.

² Tableau 18, page 442.

³ Pages 450 et suiv. On doit aussi envisager la proportion de soufre.

C'est ainsi que l'huile brute de Pennsylvanie donne, comme nous le verrons, 55 à 70 p. 100 d'huile à brûler à environ 42 degrés B. contre 50 p. 100 en Galicie et 35 à 40 p. 100 à Bakou. D'autre part, l'huile de Galicie donne souvent 8 p. 100 de paraffine, celle du Canada ou de Pennsylvanie environ 3 p. 100. Au Caucase, la teneur est très faible : ce qui facilite le transport par tuyaux sans craindre la congélation.

Au point de vue des densités, on peut remarquer : d'une part, qu'en un même point l'huile de surface (surface oil) est toujours plus lourde que l'huile puisée en profondeur (elle-même, en général, d'autant plus légère qu'on s'enfonce d'avantage), et, d'autre part, qu'à point d'ébullition égal, les pétroles du Caucase (tertiaires, comme nous le verrons) sont sensiblement plus lourds que ceux de Pennsylvanie, peut-être dévoniens.

Propriétés physiques. — Les pétroles sont, on le sait, employés : 1° pour l'éclairage; 2° pour le chauffage; 3° pour les moteurs à essence. Quelques-unes de leurs propriétés, qui interviennent dans ces applications, sont intéressantes à connaître.

Quand on chauffe le pétrole, il dégage des vapeurs combustibles qui, mélangées à l'air, font explosion. Le degré de la température, auquel les vapeurs prennent feu, est le *point d'inflammabilité*.

On désigne, sous le nom d'*ignibilité* d'un corps, sa propriété de continuer à brûler une fois allumé et lorsqu'on le chauffe à une température déterminée, ou point d'ignition. En France, d'après le décret relatif à la réglementation des fabriques et des dépôts d'huiles minérales (18 août 1886), les huiles destinées à l'éclairage ne doivent émettre des vapeurs susceptibles de s'enflammer au contact d'une allumette en ignition qu'à une température égale ou supérieure à 35°.

La *capillarité*, propriété importante quand il s'agit de l'éclairage dans les lampes, varie beaucoup avec les différents pétroles. Elle est moins grande dans les pétroles riches en huiles lourdes.

La *densité* des pétroles bruts diminue rapidement sous l'influence de la température : ce qui peut avoir des conséquences graves pour un réservoir rempli à basse température et ultérieurement soumis à la chaleur solaire. Le coefficient de dilatation s'accroît, en effet, de 0,000 6 à 0,000 7 quand on passe de —6° à plus de 75° et la densité correspondante s'abaisse de 0,887 à 0,833.

Enfin, comme combustible, nous rappelons que le pétrole a un *pouvoir calorifique* supérieur à celui des charbons à poids égal : environ 9 000 à 11 700 calories, contre 8 500 pour une houille à gaz.¹

6) EXTRACTION, TRAITEMENT, COMMERCE ET STATISTIQUE

L'exploitation du pétrole, tout en présentant certaines variantes suivant les districts, offre, lorsqu'on reste, comme nous devons le faire ici, dans les très grandes lignes du problème technique, beaucoup de caractères constants, qui tendent de plus en plus à se généraliser dans les districts pétroliers nouveaux. Il faut toujours commencer par reconnaître le champ

¹ Voir le tableau 18, p. 442.

pétrolifère au moyen de sondages, puis le mettre en exploitation : ce qui se fait par un ensemble d'autres sondages, semblables à ceux qui ont servi pour la recherche, mais naturellement facilités par la connaissance antérieure du terrain. Après quoi, l'huile brute, sortie du sondage, soit par pompage, soit par jaillissement naturel, est transportée à l'usine de raffinage, avec emploi de dispositifs spéciaux, tels que les canalisations ou *pipe-lines*, les bateaux et wagons-citernes, etc. Enfin elle subit un raffinage, consistant en des distillations fractionnées alternant avec des traitements acides et basiques.

Sondage. — Dans un district nouveau, on doit toujours s'organiser pour pouvoir approfondir un sondage de recherches au moins jusqu'à 600 m. et plutôt jusqu'à 1 000 m. Dans les districts déjà connus et pour les sondages d'exploitation, on peut se contenter de moins. Le sondage peut s'exécuter par le procédé à la corde ou procédé américain, par le procédé canadien aux tiges de bois, par le sondage ordinaire à la tige rigide de fer, enfin par un procédé à curage hydraulique avec percussion ou avec rotation.

Un tel sondage, dont nous n'avons pas à donner le détail, est toujours caractérisé extérieurement par la haute charpente, ou *derrick*, que nécessite la manœuvre des tiges ou des cordes portant à leur extrémité le trépan ; et la multiplicité des derrick presque juxtaposés donne aux champs pétrolifères leur aspect bien connu. Les sondages pour pétrole, étant faits pour durer, doivent toujours être tubés, au moins partiellement ; mais les Américains réduisent d'ordinaire ce tubage (*casing*) au minimum. Nous nous bornerons à quelques indications sur la comparaison des divers procédés de sondage entre eux et sur les particularités tenant à l'objet spécial des sondages, en restant dans le domaine économique. Nous essayerons, en même temps, de fixer les idées par quelques chiffres, quoique, dans une entreprise aussi aléatoire qu'un sondage, ces prix varient dans de très fortes proportions pour le même district et qu'ils soient naturellement très différents d'un district à l'autre.

Les chiffres suivants ne doivent donc être pris que comme des indications très vagues.

1° Le *sondage à la corde, ou américain*, dont la première application a été faite très anciennement en Chine, est devenu, entre les mains des Américains, avec des ouvriers très expérimentés, une méthode excellente pour exécuter rapidement et économiquement des sondages, à la condition que ceux-ci se trouvent dans certaines conditions déterminées. Il nécessite des derrick de 25 m. de haut pour pouvoir sortir les outils du trou de sonde en une seule fois sans être obligé de s'arrêter pour en démonter les éléments.

On arrive, avec cette méthode, à de grandes profondeurs : assez fréquemment, 600 et 700 m. ; une fois même, 1 800. Mais le procédé est surtout avantageux pour arriver très vite à 200 ou 400 m. dans des terrains réguliers et faciles, connus d'avance par d'autres sondages, comme c'est le cas ordinaire dans le bassin des Appalaches. On cite là un forage de 272 m. effectué en cinq jours (54,40 m. par jour) ; un autre de 330 m. en vingt et un jours. Pour avancer d'un mètre il faut, plus généralement, dans un

grès moyen, jusqu'à 500 m., six à sept heures. avec accroissement progressif de la durée quand on s'enfonce. Un sondage moyen de 500 m. avec tubage partiel a pu être parfois exécuté pour un prix total de 18 à 20 000 fr., ou 36 à 40 fr. par mètre, derrick et tubage compris. Mais les conditions de l'entreprise varient beaucoup suivant les districts. Généralement, le propriétaire fournit le derrick et la chaudière; les entrepreneurs, seulement les outils, le charbon, et la main-d'œuvre. Le matériel (derrick, chaudière et outils), peut, suivant les difficultés du terrain à traverser, revenir entre 10 000 et 35 000 fr. Le forage lui-même ne coûte que 10 à 15 fr. par mètre. Quand le terrain est boulant ou irrégulier, comme cela arrive très fréquemment dans les sondages d'Europe, le procédé perd vite ses avantages. Il faut alors un derrick plus coûteux et des tubes plus épais. On doit prévoir, dans ces conditions, pour atteindre 5 à 600 m., 35 000 fr. d'outillage, 35 000 fr. de tubage et 30 000 fr. de forage: soit, en chiffres ronds, 100 000 fr. et compter, au maximum, sur 2 m. d'avancement journalier.

2° Le *sondage canadien* se distingue du procédé à la corde par l'emploi de tiges rigides en bois. Le derrick, beaucoup plus léger et haut seulement de 16 m., peut être aisément et rapidement établi. Très commode dans des terrains faciles, et aux faibles profondeurs, il permet alors de forer en quinze jours un puits de 150 m. pour une quinzaine de mille francs. En Galicie, on l'a employé une fois à Boryslaw pour aller jusqu'à 1 136 m. Un sondage canadien de 500 m. coûte 24 000 fr. de derrick et outils. Le sondage, dans ces limites, revient à 120 fr. par mètre. Au delà et jusqu'à 1 000 m., le mètre courant s'élève progressivement de 150 à 200 fr. Un puits de 1 100 à 1 200 m. peut coûter entre 160 et 200 000 fr., avec au moins quinze mois de travail; par exemple: 36 000 fr. d'installation, 46 000 fr. de main-d'œuvre, 10 000 fr. d'outils et réparations, 12 000 fr. de fournitures, 56.000 fr. de tubages. La vitesse de forage, qui dépasse 200 m. dans le premier mois et 150 m. dans le second, descend ensuite progressivement à 30 ou 20 m.

En Roumanie, pour atteindre 400 m., on part d'un diamètre de 500 mm. que l'on réduit progressivement à 200 mm., et l'on dépense, tubage inclus, mais non compris les frais généraux, au minimum 110 à 120 fr. par mètre. Il est prudent, pour un sondage moyen de 350 m., de prévoir près du double, ou 220 fr. par mètre. Dans ce cas, on dépense au total: forage 30 000; tubage (50 à 60 fr. par mètre): 21 000; administration 1 800; total 77 800¹.

3° Le *sondage à la tige rigide en fer*, beaucoup plus lent, mais plus sûr, est celui que l'on emploie couramment en Russie et fréquemment en Galicie. Ailleurs il tend à disparaître. L'outillage coûte environ 40 000 fr. et, quand on a des ouvriers habiles, le forage, tous frais payés, revient entre 150 et 250 fr. le mètre, avec avancement de 1 à 2 m. par jour jusqu'à 600 m. Si l'on pousse jusqu'à 1 200 m., on arrive à un prix de 300 fr., avec un avancement de 0,70 m. Les sondages de Bakou coûtent particulièrement cher et dépassent presque toujours 300 fr. le mètre pour atteindre 450 fr. avec

¹ Nous verrons plus loin des chiffres beaucoup plus faibles. On peut économiser beaucoup sur les tubes, parfois même employer des tubes achetés d'occasion, mais non parfois sans inconvénient pour le sondage.

avancement de moins de 1 m. Il faut prévoir, pour un sondage de 280 m. : 31 000 fr. de forage (outils et main-d'œuvre), 32 000 fr. de tubage, 4 500 fr. de rivetage et mise en place, 12 500 fr. de combustible, 6 500 de frais généraux, soit 86 500 fr. ou 382 fr. par mètre ; pour un sondage de 450 m., 180 000 fr. (415 fr. par mètre). Un forage de 450 m. demande vingt mois. Partant d'un diamètre de 660 mm., il arrive à 350 mm.

4° Les sondages hydrauliques (procédés Fauvel, Raky, etc.), si employés aujourd'hui pour des recherches diverses, offrent l'avantage que le fond du trou de sonde est sans cesse tenu propre et que le trépan travaille plus efficacement. On évite, en même temps, le temps perdu pour remonter le trépan afin d'enlever les détritits du fond.

Une autre supériorité du système Raky est dans son mode de suspension élastique.

On peut ainsi, dans des terrains favorables, aller très vite : 1 m. à l'heure dans un terrain de dureté moyenne, non compris la durée des réparations et celle du tubage : ce qui donne au total un avancement moyen de 8 à 20 m. par jour. Par contre, on peut traverser des couches pétrolifères sans les soupçonner ; ce qui, dans les recherches, est un défaut capital. Ce sont donc des engins d'exploitation, et non de recherches.

En Allemagne, les sondages de la région de Wietze sont généralement faits au système hydraulique dit Rapid. Ils coûtent 20 000 francs pour atteindre 250 m.

5° Enfin les sondage au diamant à couronne rotative, qui ont permis d'atteindre 2 003 m. à Paruschowitz, sont peu employés, jusqu'ici, pour le pétrole. Ils permettent cependant, quand on n'a pour but qu'une recherche, d'aller vite à une grande profondeur avec un petit diamètre, en évitant ainsi le tubage.

Tubage. — Les sondages pétrolifères doivent être tubés et, bien que les Américains se contentent parfois, dans un puits de 400 m., de tuber 80 ou 100 m. à la traversée des eaux ou à la rencontre des sables éboulés, l'usage d'un tube continu sur toute la hauteur est plus généralement répandu. Il y a à cela deux raisons principales. D'abord il faut maintenir les terrains éboulés. Ensuite il faut isoler les nappes aquifères supérieures à la nappe pétrolifère, les « serrer » suivant l'expression consacrée¹ ; sans quoi l'on risquerait de noyer le pétrole, de le refouler par la pression hydrostatique. Cet isolement des eaux est le but principal de ce que les Américains appellent le *casing*. Enfin il faut, en tout cas, un tube d'extraction, dit *tubing*, par lequel le pétrole remonte naturellement, ou est pompé au jour.

Après avoir traversé les premiers terrains superficiels par ce que l'on appelle un *drive pipe*, on commence donc à enfoncer une colonne de tubes, dont le diamètre primitif a été choisi pour atteindre, après les réductions progressives dont nous allons parler, la profondeur désirée².

¹ Cette opération se fait en creusant, dans une couche de résistance suffisante, un trou de sonde conique, dans le fond duquel on assoit une colonne de tubage. Après quoi, on continue à forer à l'intérieur.

² On emploie couramment des tubes de 9 pouces, 7, 6, 5 et 4 pouces (le pouce = 0,0253 m.). Les premiers valent 24 fr. le mètre, les derniers descendent à 3 fr. 50.

Cette colonne suit l'avancement du forage, allongée au fur et à mesure par des tuyaux ajoutés en haut. Tant qu'elle conserve sa mobilité et qu'on n'a pas à serrer une nappe aquifère, on garde le même diamètre de tubes; mais il arrive toujours un moment où le tubage se coince, et la distance que l'on peut franchir avec une même dimension de tubes constitue un des grands aléas du sondage. On descend alors, à l'intérieur, une colonne de tubes d'un diamètre moindre. Celle-ci peut partir du haut, comme la première, dans le *tubage dit complet*. Dans le *tubage télescopique* moins coûteux, on en recoupe dès qu'on le peut, la partie supérieure devenue inutile, quand la seconde colonne est arrêtée au fond et qu'on en descend une troisième.

Dans les niveaux où l'on rencontre du pétrole, de même qu'à la base où il s'agit de recueillir l'huile minérale, on emploie des tubes perforés.

Exploitation. — L'exploitation se fait par une série de sondages placés à une distance suffisante pour ne pas se nuire mutuellement, tout en drainant bien l'imprégnation pétrolifère comprise entre eux¹. On peut compter de 3 à 5 puits par hectare et admettre, suivant les cas, qu'un tiers à un sixième des puits forés sont stériles. A Boryslaw, où la propriété est très divisée, on arrive même à les espacer de 40 à 50 m.

Le calcul industriel d'une exploitation peut, à titre d'exemple, s'équilibrer de la manière suivante pour une concession de 10 hectares, avec 25 puits produisant 10 t. par jour, dont 15 sont productifs.

Fonçage de 25 puits à 100.000 francs; soit	
2.500.000 francs à amortir en quatre ans.	625.000 francs
Pompage, 10 francs par jour et par puits .	83.000 —
Transports et emmagasinage à 3 fr. la t. .	180.000 —
Frais généraux, redevances, impôts, etc.	470.000 —
Imprévu, environ 10 p. 100.	142.000 —
	<hr/>
	1.500.000 francs

Supposons, d'autre part, que les recettes soient de 150 t. par jour ou 45 000 t. par an. Au prix de 33 fr. la tonne rendu en gare, une exploitation de ce genre couvre exactement ses frais. Toute amélioration dans le débit moyen, le nombre des puits utiles, ou le prix de vente la met en bénéfice.

Dans la mise en exploitation d'un district pétrolifère, nous venons de supposer une certaine proportion de puits stériles. Cette proportion, comme nous le montrerons tout à l'heure par des tableaux, va très rapidement en croissant à moins que l'exploitation s'avance; elle devient bientôt telle que l'on est obligé d'abandonner le premier niveau exploité pour aller en chercher un autre plus profond. D'autre part, chacun des sondages (ou puits, comme on les appelle souvent à tort) n'a qu'une durée très limitée et variable suivant les districts. On doit considérer qu'un sondage draine l'huile emmagasinée dans les fissures ou les pores du terrain avoisinant sur un certain champ d'action. C'est la grande différence avec un puits à eau, qui s'alimente d'ordinaire par une nappe d'eau plus étendue et surtout susceptible de se renouveler. Quand un puits pétrolifère est épuisé, il arrive parfois qu'en le laissant reposer il redevienne produc-

¹ Voir plus loin, p. 539, fig. 72, le plan des sondages de Kern river

tif, si des communications avec des réservoirs souterrains plus lointains ont eu le temps de fonctionner. Les puits, d'abord jaillissants, qui faiblissent, sont réactivés par un pompage (nécessaire dès le début dans la plupart des cas). On a pu employer également un procédé plus hardi qui consiste à les *torpiller*. 30 à 150 kg. de nitroglycérine, descendus au fond et que l'on fait détoner électriquement, déterminent de nouvelles fissures et permettent au pétrole des terrains voisins d'arriver jusqu'au puits. Le résultat est très inégal suivant les cas. Notamment des huiles trop riches en paraffine peuvent être figées par le froid consécutif de l'explosion, des terrains trop argileux peuvent se boucher, etc.¹.

Dans le débit d'un puits, les gaz associés au pétrole jouent un rôle très important par la pression qu'ils exercent sur celui-ci. Cette pression peut aller au début jusqu'au jaillissement : cas fréquent dans le Caucase, rare en Pennsylvanie. Il est arrivé alors d'avoir des débits énormes pendant quelque temps. Mais ces débits ne correspondent jamais qu'à l'épuisement d'un réservoir souterrain limité. Peu à peu la pression des gaz diminue, le jaillissement cesse ; il faut pomper et le puits finit enfin par s'épuiser complètement. Cet affaiblissement de la pression des gaz contribue ainsi pour beaucoup à l'épuisement d'un niveau pétrolifère tout entier.

Transport du pétrole. — Le pétrole une fois extrait, il reste à le transporter au point de vente et à l'élaborer. Ce transport du pétrole est une opération délicate et qui a été l'objet de perfectionnements intéressants.

Lorsque l'industrie du pétrole se développa en Pennsylvanie, on eut bientôt fait d'y installer des chemins de fer suivant les vallées tortueuses des affluents de l'Allegheny. Sur ces chemins de fer, on commença par transporter le pétrole en barils amarrés sur une plate-forme, puis en cuves de bois de 7 m³.

Après quoi, on utilisa les courants d'eau. On faisait le chargement sur des « *pond freshets* » par 15 à 20 000 barils et on les amenait ainsi à Oilcity, où l'huile était transbordée dans de plus grands bâtiments. A une époque, 1 000 bateaux, 30 steamers et environ 4 000 hommes furent employés à ce trafic. En 1864, 20 à 30 000 barils ayant été perdus par accident, on se servit de barques divisées en compartiments. Puis, en 1871, les cuves de bois disparurent pour être remplacées par des réservoirs cylindriques en fonte de 10 à 20 m³, encore aujourd'hui un peu en usage.

Mais une véritable révolution se produisit le jour où l'on appliqua l'idée de transporter le pétrole en le refoulant par des pompes dans des tuyaux, dits *pipelines*.

Le premier essai fut fait par Hutchinson, qui installa un pipeline de 3 km., en plaçant, pour égaliser la pression et éviter les engorgements, tous les 20 ou 30 m., des chambres à air d'environ 0,25 m., de diamètre. Cette tentative fut malheureuse. A peu près toute l'huile s'échappa par les joints. Mais on ne se rebuta pas, et bientôt on arriva au résultat désiré. Aujourd'hui des lignes de tuyaux, dont le diamètre moyen est de 0,15 m., traversent tous les États-Unis comme un réseau de chemin de fer sur plusieurs milliers de kilomètres de longueur (voir la fig. 59), coupent droit à travers collines et vallées et distribuent chaque jour des

¹ En Allemagne, cette pratique est défendue par la loi.

milliers de barils d'huile, sur leur chemin ou à leur extrémité. En 1904, la Standard Oil a transporté, du bassin des Appalaches à la côte, par 7 lignes de tuyaux, près de 32 millions de barils : soit, sur chaque ligne, 1 200 barils par jour. Un pipeline suit également, de Bakou à Batoum, toute la longueur du Caucase en passant par Elisabethpol et Tiflis.

D'ordinaire les sources sont en relation avec les lignes principales par des tuyaux de 0,05 m. L'huile est d'abord reçue dans des cuves à son émergence, puis emportée par le tuyau, sur lequel, de distance en distance, en moyenne tous les 50 à 100 km., il y a des stations de pompes, reliées télégraphiquement et téléphoniquement.

La puissance de ces machines doit être assez grande pour faire passer

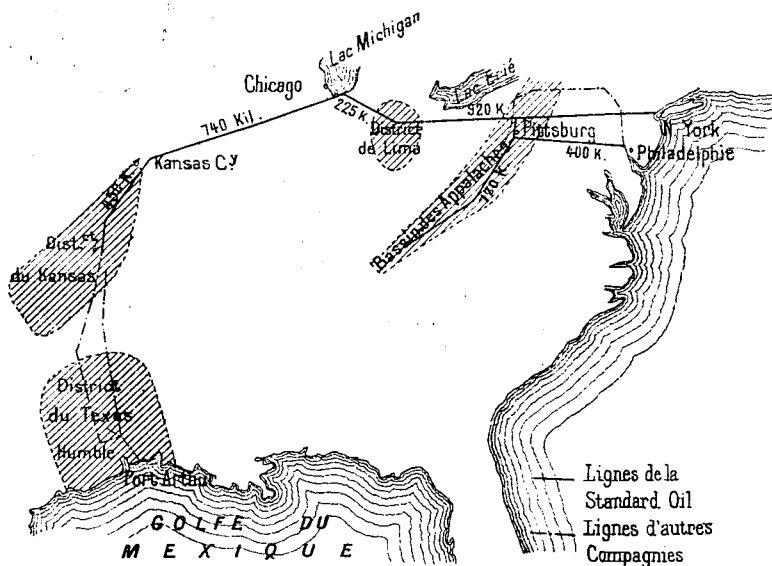


Fig. 59. — Carte des pipelines pétroliers aux États-Unis.

l'huile rapidement sur les collines, en triomphant de la résistance due au frottement qui, par suite de la vitesse imprimée au pétrole, est considérable, dépassant parfois 20 atmosphères. A l'extrémité, le pétrole est reçu dans des réservoirs considérables, dont on se fera une idée par ce fait que, le 1^{er} janvier 1908, la Standard Oil avait, dans ses réserves et ses conduites, 32 millions de barils.

Il existe, d'autre part, des navires spécialement aménagés pour le transport par mer ou sur les grands fleuves.

Traitement. — Avant d'être livrés au commerce, les pétroles bruts ont à subir de nombreux traitements, dont les produits, plus ou moins raffinés, portent des noms divers. C'est une question dont nous n'avons pas à parler ici. Il suffit de dire en deux mots que la distillation de l'huile de pétrole brute donne successivement : des *gaz non condensables* à la température ordinaire ; puis de l'*ether de pétrole* passant entre 46° et 70° (poids spéci-

fique 640 à 660); de l'essence minérale (pour lampes à éponge) de 70° à 120°; de l'huile lampante de 150° à 280°; de l'huile lourde de 300° à 400°, de la paraffine; enfin, comme résidus, des goudrons, du coke de pétrole et, dans certaines conditions, de la vaseline. Jusqu'à 300° ou 350°, la distillation se fait régulièrement. Puis il se produit une décomposition, dite *Cracking* par les Américains. Il se fait un résidu goudronneux et, si on élève la température, on a du coke.

La valeur d'une huile dépend de la proportion d'huile lampante, de paraffine et de benzine (c'est-à-dire de produits passant au-dessous de 120°).

On opère par distillation fractionnée, avec traitement à l'acide sulfurique et au carbonate de soude.

L'huile de Pennsylvanie donne : 5 à 20 p. 100 de naphte brut entre 66 et 87° B; 55 à 70 p. 100 d'huile à brûler entre 38 et 48°; 5 p. 100 de perte par volatilisation; 3 p. 100 de résidu.

L'huile du Canada donne : 12,5 p. 100 de naphte brut à 62° B; 55,8 p. 100 d'huile à brûler à 42° B; 43,7 p. 100 d'huile de graissage; 3 p. 100 de paraffine; 5,2 p. 100 de coke; 1,8 p. 100 de perte.

L'huile de la Galicie orientale donne : 50 p. 100 huile à brûler à 32° B; 20 p. 100 huiles très volatiles; 8 p. 100 de paraffine; 8 p. 100 de goudron; 10 p. 100 de résidu; 3 p. 100 de perte.

L'huile russe donne : 5 à 10 p. 100 de gazoline et essences légères, 32 à 50 p. 100 d'huile lampante et 20 à 30 p. 100 d'huile lourde, avec des résidus employés au chauffage sous le nom d'*astakis*. Nous avons déjà fait remarquer la grande différence entre la proportion d'huile lampante obtenue à Bakou (32 à 50 p. 100) et en Pennsylvanie (70 à 80 p. 100).

Production du pétrole. — Historique et statistique. — Nous nous contenterons de rappeler sommairement l'histoire de l'industrie du pétrole, qu'on peut trouver développée dans divers ouvrages spéciaux.

L'usage des hydrocarbures remonte à une haute antiquité.

La Bible signale l'emploi du bitume dans la construction de l'arche de Noé et de la tour de Babel, au moment de la destruction de Sodome, dans le livre des Macchabées, etc.¹ Hérodote (440 ans avant J.-C.) parle d'une ville située près de Suse, où il y avait des mines de sel, de bitume et d'huile. Sur les bords de la Caspienne, en Perse, dans les vallées du Tigre et de l'Euphrate, les gaz combustibles jaillissants ont même été l'objet d'un culte religieux depuis l'antiquité. En Amérique enfin, on trouve, dès 1627, dans les travaux d'un missionnaire français, Joseph Delaroche-d'Aillon, une première mention des gisements pennsylvaniens; mais il faut arriver à notre siècle pour constater un emploi industriel de ces produits minéraux.

Ce sont d'abord des essais pour utiliser l'huile minérale extraite des schistes bitumineux par distillation.

En 1830, on peut citer une première tentative faite à Autun par Seligie, qui obtint de l'huile en distillant des schistes bitumineux. Puis, en 1845, un Américain, Abraham Gesner, parvint à extraire une huile lampante de la houille. En 1847, James Young, de Glasgow, établit, dans le Derbyshire, une vaste usine pour traiter le boghead et le cannelcoal.

¹ Genèse (XI, 3, XIV, 10). Job (XXIX, 6), etc.

Néanmoins, l'emploi des huiles minérales resta fort limité jusqu'à la seconde moitié du XIX^e siècle. Entre 1845 et 1855, on avait foré dans la région de Tarantum en Pennsylvanie, un certain nombre de puits pour obtenir de l'eau salée. Quelques-uns donnèrent du pétrole, que l'on employa d'abord comme médicament. En 1854, Brewer et Watson fondèrent la première société pétrolifère et, en 1858, on employa, pour la première fois, le tubage en fer superficiel, dit « drive pipe ». A ce moment, il se produisit un afflux énorme de travailleurs. En 1860, on obtint 200 barils¹ par jour; au début de 1871, 700; à la fin de l'année, 7 000. Le prix du pétrole tomba alors un moment, par surproduction, à 0,40 fr. les 100 kg.

Cependant, les courants commerciaux ayant commencé à s'établir, la spéculation prit alors des proportions colossales. Rien que dans New-York, il y eut bientôt 317 compagnies représentant un capital de plus d'un milliard. Toute la région entre Titusville et Oil city, sur 22 km., fut perforée dans tous les sens. Le premier grand centre mondial de production du pétrole, la Pennsylvanie, était constitué.

On y a trouvé quelques sources extraordinaires; ainsi *l'Empire well*, qui fournissait 2 000 barils par jour en 1862 et ne fut épuisé qu'en 1866; *Phillipswell*, qui donna 3 000 barils par jour pendant six semaines. Mais surtout le nombre des puits se multiplia rapidement. En 1867, on imagina la théorie des bandes parallèles aux plissements, ou « Belt theory » et l'on sonda de plus en plus un peu partout. En sorte que la production, pendant quelques années d'abord contenue dans des limites assez restreintes (moins de 4 millions de barils de pétrole brut jusqu'en 1870), put faire, de 1870 à 1883, un bond énorme jusqu'à 31 millions de barils, en même temps que l'usage du pétrole pour l'éclairage se répandait dans toutes les parties du monde et que ses emplois comme combustible se généralisaient en Amérique.

Cependant on commençait à chercher de tous côtés des gisements semblables à ceux qui avaient eu cette extraordinaire fortune. On en trouva : en Amérique dans la Virginie, l'Ohio, le Canada, la Caroline, le Colorado, la Californie; en Europe, dans l'Alsace, la Province de Parme, la Galicie, la Roumanie. Mais aucun de ces gisements n'était de nature à pouvoir lutter avec ceux d'Amérique jusqu'à la découverte (en 1879) de ceux du Caucase, qui, depuis 1882, ont pris à leur tour une expansion considérable en envahissant le marché de l'Orient et refoulant de l'Est de l'Europe les pétroles d'Amérique. En 1900, la production, toujours croissante, du pétrole brut au Caucase a un instant dépassé celle des Etats-Unis; mais il ne faut pas oublier qu'au Caucase on n'obtient parfois que 35 p. 100 d'huile lampante contre 70 p. 100 en Pennsylvanie.

Dans les dernières années, l'industrie nord-américaine du pétrole s'est déplacée, comme nous allons le voir, par le développement de la Californie et du Kansas. Dans le reste du monde, il faut surtout citer les gisements nouveaux des Iles de la Sonde et de Birmanie et le renouvellement des groupes anciennement connus de Galicie et de Roumanie.

Des tableaux ci-joints donnent : 1^o la répartition de la production pétrolifère dans le monde depuis 1860; 2^o la division entre les principaux États

¹ Le baril de pétrole vaut 159 litres.

des Etats-Unis depuis 1890¹. D'autres chiffres de détail seront donnés à l'occasion des descriptions successives.

TABLEAU 21. — PRODUCTION MONDIALE DU PÉTROLE BRUT EN MILLIERS DE TONNES²

ANNÉES	ÉTATS-UNIS	RUSSIE		ILES DE LA SONDE	GALICIE	ROUMANIE	INDE (Birmanie.)	JAPON	CANADA	ALLEMAGNE et Alsace.	ITALIE	MONDE ENTIER Total approximatif.
		Bakou	Grosny									
1860	65	4	»	»	»	1	»	»	»	»	»	71
1870	684	23	»	»	»	10	»	»	»	»	»	720
1880	3 418	405	»	»	32	15	»	39	48	»	»	4 000
1890	5 957	3 700	54	2	97	41	15	79	103	»	»	10 100
1900	8 749	9 850	503	426	326	250	137	113	92	51	1,6	24 448
1902	11 906	10 410	568	732	611	310	209	143	73	50	2,6	24 700
1904	16 055	10 560	652	1 022	827	494	475	215	71	60	3,5	29 118
1905	18 969	7 600	670	1 062	801	615	581	177	72	90	4,8	29 878
1906	17 862	8 168		1 186	740	887	564	217	73	81	6,0	29 775
1907	22 287	8 435		1 200	1 176	1 129	587		101	106	8,3	36 405
1908	24 401	7 631		1 444	1 754	1 147	661	276	68	141	7,0	38 754
1909	24 433	8 037		1 420	1 352	1 263	905	»	74	143	5,9	39 197
1910	29 585	8 953		1 500	1 491	1 352	1 017	258	40	»	»	45 752

TABLEAU 22. — PRODUCTION DU PÉTROLE BRUT AUX ÉTATS-UNIS EN 1 000 BARILS²

ANNÉES ³	TOTAL des États- Unis.	TOTAL du bassin des Appalaches.	BASSIN DES APPALACHES					Lima Ohio Indiana.	Kansas et territoire Indien.	Texas et Louisiane.	Californie.	Colorado.	Wyoming.	Illinois.
			Pennsylvanie et New-York.	Virgine occidentale.	Ohio Sud-Est.	Kentucky et Tennessee.								
1890	45 820	30 073	28 458	492	1 108	6	15 000	1	»	300	665	»	»	
1896	52 892	30 960	19 144	8 120	3 693	2	15 850	44	»	1 200	438	3	»	
1900	63 620	36 295	14 559	16 195	5 575	62	16 884	80	830	4 320	317	5	»	
1902	87 800	32 018	13 183	12 899	5 136	185	15 877	368	18 631	13 973	396	5	»	
1904	118 400	31 408	12 239	12 644	5 526	998	13 350	5 586	28 283	28 476	502	11	»	
1905	140 000	29 336	11 555	11 578	5 016	1 200	22 102	13 000	40 026	35 671	377	8	181	
1906	132 000	28 345	»	»	»	1 000	25 680	21 929	19 766	30 538	600	13	4 900	
1907	164 000	26 750	»	»	»	1 250	8 030	47 556	16 970	40 085	400	13	24 540	
1908	178 203	24 240	»	»	»	1 250	7 287	48 274	16 920	45 000	411	13	36 685	
1909	182 205	25 394	»	»	»	639	6 192	48 007	12 476	58 258	310	22	30 898	
1910	218 107	26 089	»	»	»	750	5 171	59 032	15 890	77 690	350	22	32 984	

¹ On trouvera des tableaux pour la période antérieure dans notre premier *Traité des gîtes minéraux*, p. 84, etc.

² Les productions sont souvent comptées en barils américains de 42 gallons ou 159 litres, représentant, en moyenne, à la densité de 0,810, 129 kilogs. En Russie, on compte en pouds de 16,38 kg. : le baril américain pesant 7,86 pouds. Au Japon, on compte en kokus (1,13 barils américains) pesant 147 kg. C'est à peu près la valeur du fût à pétrole en bois, du commerce courant en France.

³ Les chiffres, comme pour toutes les statistiques, diffèrent quelque peu suivant leur provenance. Nous avons, pour les dernières années, adopté ceux de la Mineral Industry.

Nos tableaux montrent la production mondiale fournie environ pour 64 p. 100 par les Etats-Unis, 20 p. 100 par le Caucase, 4,4 p. 100 par les Iles de la Sonde, 3,3 p. 100 par la Galicie, 2,9 par la Roumanie et 2 p. 100 par la Birmanie. Si l'on subdivise les Etats-Unis à leur tour, l'on voit la Californie contribuer pour 21 p. 100 à la production mondiale, le Kansas pour 15 p. 100, le bassin des Appalaches pour 8 p. 100.

La comparaison des chiffres à quelques années de distance fait, en outre, ressortir une loi économique et industrielle d'un intérêt général.

C'est d'abord, de 1860 à 1904, l'énorme essor de la production pétrolière dans le monde, arrivant à dépasser 29 MT; puis, c'est l'arrêt de 1904 à 1907 et de nouveau la reprise depuis 1907 jusqu'à 45 MT en 1910, grâce à la mise en valeur et au développement considérable de certains districts nouveaux, qui ont comblé, et au delà, le déficit causé par l'épuisement des plus anciens.

Cette allure un peu incertaine de la courbe, par laquelle on peut représenter la production pétrolière, est surtout frappante quand on la compare avec celles, plus régulièrement ascendantes, qui concernent la plupart des substances minérales. Elle ne tient pas, comme nous allons le dire, à la consommation, qui devient de plus en plus avide de pétrole. Mais la richesse pétrolière est particulièrement limitée et l'épuisement prévu, qui, pour la houille par exemple, n'intéressera que nos très lointains descendants, peut, malgré les trouvailles à espérer en bien des pays, se manifester, dans un temps relativement court, pour les pétroles.

Cette impression n'offre encore rien d'inquiétant dans l'ensemble; mais elle s'accroît à mesure que l'on examine les choses plus en détail et qu'on passe en revue les régions, autrefois florissantes, puis (dans ces régions), les districts réputés. Le champ pétrolière des Appalaches, a été le plus considérable du monde, et, par son extension géographique, il a pu se soutenir spécialement longtemps: un quartier nouveau prenant la place d'un autre, comme un niveau de pétrole plus profond remplaçait un autre plus élevé. Néanmoins, on est, en 1910, fort au-dessous des chiffres de 1890, et, depuis 1900, la décroissance est manifeste. Dans la Pennsylvanie et l'État de New-York, où ont été faits les premiers travaux et qui, encore en 1890, fournissaient la presque totalité de la production des Appalaches, cette chute a commencé dès 1891. On avait atteint, cette année-là, 33 000 000 de barils; on est descendu peu à peu à 11 555 000 en 1905. Même phénomène dans la Virginie occidentale, dont la rapide expansion vers 1906 a balancé un moment la chute de la Pennsylvanie. Cet État, qui produisait 492 000 barils en 1890, est monté très vite à 16 195 000 en 1900. Depuis, il baisse, lui aussi, d'une façon progressive et sa production, sensiblement égale à celle de la Pennsylvanie avec l'État de New-York, suit presque exactement la même loi de chute. L'Ohio Sud-Est, avec des chiffres moindres, semble lui aussi avoir dépassé son point haut.

Ailleurs le phénomène a pris une allure de débâcle, comme dans le Texas, où l'on était parti de zéro avant 1896 pour atteindre 40 000 000 de barils en 1905, et où, l'année suivante, on est retombé à 19, puis à 17 en 1908, à 15 en 1910.

De même la région de Lima-Indiana et de l'Ohio est descendue de 25 680 000 barils en 1906 à 7 287 000 en 1908, à 3 171 000 en 1910.

Assurément, quand il s'agit d'un continent entier comme les Etats-Unis, les découvertes nouvelles compensent, et au delà, la disparition des anciens centres. Ainsi l'Illinois, apparu en 1905, a fait un bond prodigieux jusqu'à 36 686 000 barils en 1908; mais la courbe de production commence déjà à s'y infléchir. La Californie, qui avait paru baisser en 1906, a repris son ascension très rapide jusqu'à près de 78 000 000 de barils en 1910. Le Kansas et le territoire indien sont également sur la voie ascendante (59 032 000 barils en 1910). Mais, si l'avenir immédiat n'a encore rien de menaçant pour des étendues aussi vastes, l'observation doit être retenue chaque fois qu'il s'agit d'apprécier l'avenir industriel d'un district.

On peut remarquer également, dans le cas spécial des Etats-Unis, qu'aux bons pétroles riches en huiles lampantes des anciens districts, se substituent peu à peu les pétroles de l'Ouest, en grande partie utilisables seulement comme combustibles.

En Galicie même, où le chiffre global montre la production doublée de 1906 à 1910, les constatations sont moins encourageantes quand on envisage des districts individuels, Boryslaw, dont la vogue date de 1900, était déjà presque fini en 1908. Au Caucase, à Bakou, la profondeur moyenne des puits était de 60 m. en 1877, de 150 m. en 1885, de 400 m. (à Bibi Eybat) en 1904, de 534 au même point en 1906. De 1896 à 1906, les rendements ont été réduits en moyenne dans la proportion de 3 à 1. En même temps, le pourcentage des puits abandonnés a monté de 16 à 40 p. 100. Malgré le développement de districts nouveaux, la production totale du Caucase n'a pas retrouvé en 1910 les chiffres de 1900 et, en 1911, elle a encore perdu 450 000 t.

Si, au lieu d'examiner les districts entiers, on considère les divers niveaux d'un même district, on voit, de la même façon, les anciens s'épuiser l'un après l'autre, la production des puits décroître, en même temps qu'augmente la proportion des puits stériles par rapport aux puits utiles, etc. Dans le riche district de Bradford, en Pennsylvanie, le rendement moyen journalier d'un puits était, en 1898, de 12 barils; il est tombé à 3,4 en 1904.

Que l'on doive trouver encore de nombreux districts pétrolifères aujourd'hui inconnus, cela est certain; car nous entrons à peine dans l'ère des sondages rapides et relativement économiques¹. Mais on n'en assistera pas moins, suivant toutes vraisemblances dans un avenir assez rapproché, à la fin de certaines grandes régions, qui paraissaient, il y a un quart de siècle à peine, inépuisables².

Cela correspond avec une observation que nous aurons souvent l'occasion de faire, non seulement pour le pétrole, mais pour d'autres substances, à l'encontre de certains préjugés très répandus. Quand on examine quelque-une de ces cartes où l'on s'est attaché à noter toutes les manifestations pétrolifères, on a d'abord l'impression qu'il existe du pétrole un peu partout dans le monde; et, notamment le long de certaines zones, il semble y avoir une traînée de gisements à peu près continue. En

¹ Parmi les districts nouveaux, on peut citer ceux de Maikop au Caucase, de Sakhalin, de la Perse,

² Voir pour le développement de cette question. L. DE LAUNAY. *La conquête minière*, p. 329.

réalité, les centres de production vraiment susceptibles de prendre une importance mondiale sont extrêmement limités et, dans chacun d'eux, ces points d'accumulation extraordinaire, qui frappent l'imagination, le sont bien plus encore. Leur durée, très précaire, est généralement de quelques années à peine.

Sur l'immense territoire des Etats-Unis où les champs pétrolifères reconnus occupent une si vaste extension (fig. 61, 62, 63), on voit, dès que l'on précise, la forte production se localiser en quelques bassins favorables comme ceux des Appalaches, de l'Illinois, du Kansas et de la Californie. Et, dans chacun d'eux à son tour, il est facile de constater que quelques districts restreints ont contribué, pour la presque totalité, au chiffre global : Bradford, Warren, Butler et Clarion, Smith's Ferry, etc., dans le bassin des Appalaches ; Casey dans l'Illinois ; Iole et Humboldt au Kansas ; le comté de Kern en Californie.

En Russie, Bakou et Grosny ont seules une importance réelle. Les îles de la Sonde, c'est surtout un ou deux districts de Sumatra. En Roumanie, parmi tant de centres productifs, seul le district de la Prahova a compté dans ces dernières années. En Galicie, Roga, Sohodnica, Boryslaw, Tustanowitz, se sont très rapidement succédé à six ou huit ans d'intervalle. En Birmanie, Yenang-Young fournit la plus grande part.

De même, pour la petite production de l'Allemagne, venant de Wietze et de Pechelbronn, etc.

Commerce et prix. — La localisation relative de l'industrie pétrolifère a permis, plus que pour la plupart des autres grandes substances minérales, la constitution de trusts colossaux, susceptibles de conclure, à certains moments, entre eux, des traités de paix pour se partager le monde.

La Standard Oil est la plus connue ; elle domine en fait le monde entier par son entente avec d'autres groupes de premier ordre, comme la maison Rothschild qui tient le Caucase, la Royal Dutch qui gouverne les Indes hollandaises, etc.¹. Dans ces dernières années, le marché du pétrole a été fortement influencé par la lutte entre la Standard et la Royal Dutch et par les batailles politiques qui se sont livrées aux Etats-Unis autour de la Standard.

En regard avec la production dont nous venons de donner le détail, la consommation ne demande qu'à s'accroître dans la mesure où les prix de vente le lui permettent.

En 1867, la consommation moyenne par an et par habitant était en France de 47 grammes. Elle a été de 6 kg. en 1890. En 1902, on importait, dans notre pays, pour 47 millions de pétrole et d'huile, en 1909 pour 94,3 de pétrole et 17,7 d'huile lourde ; en 1910 pour 60 et 11,9.

Tant que la consommation mondiale a été limitée à l'emploi du pétrole lampant, le pétrole était surpassé, pour la force d'éclairage, par l'électricité, l'acétylène, le gaz, etc., et ses débouchés étaient restreints. Mais, comme combustibles, la benzine et les résidus de pétrole ont tout avantage par leur puissance calorifique et leur prix. Les benzines sont aujourd'hui

¹ 1899. ZÖPFL. *Der Wettbewerb des russ. und amerik. Petroleums* (Berlin, 166 p.).

recherchées pour les moteurs, et les résidus, depuis longtemps utilisés sur une grande échelle en Russie, se font progressivement une place plus générale.

Ce mouvement s'est beaucoup précipité depuis quelque temps. Certains pays producteurs d'huile lourde la substituent progressivement aux combustibles solides. Ainsi dans les Etats du Pacifique, où les deux produits entrent déjà pour une part égale dans toutes les industries et les chemins de fer. En 1910, les seuls locomotives des divers Etats du Pacifique ont consommé 18 millions de barils de pétrole. Ailleurs les marines de guerre tendent à adopter le pétrole pour économiser la place et faciliter le chargement, malgré le défaut qui peut en résulter pour la stabilité.

Les prix du pétrole ont subi dans le passé, suivant les moments et les régions, de grosses variations, qui n'auraient plus qu'un intérêt rétrospectif¹. Actuellement voici quels sont les prix du pétrole brut².

En 1910, on a coté en moyenne, aux Etats-Unis, le baril de Pennsylvanie, 7 fr. (54 fr. 20 la tonne); celui de North-Lima (Ohio, Indiana), 4 fr. 10; celui de South-Lima, 4 fr.; celui de l'Illinois, depuis 2 fr. 50 pour les huiles lourdes jusqu'à 3 fr. pour les huiles légères; celui de Californie depuis 1 fr. 50 pour les huiles lourdes jusqu'à 3 fr. pour les plus légères (11 fr. 50 à 23 fr. la tonne). En 1911, les pétroles du Caucase se sont vendus autour de 38 fr. la tonne (23 à 27 kopeks le poud).

c. — GÉOLOGIE DU PÉTROLE. SON ORIGINE. SA RÉPARTITION

Toute recherche de pétrole suppose implicitement une hypothèse sur son origine et sur son mode de dépôt ou d'accumulation dans les terrains où nous allons le chercher.

Nous allons commencer par examiner cette question si importante de l'origine du pétrole. Nous verrons ainsi que la géologie seule paraît susceptible d'en fournir une solution plausible : solution qui, à notre avis, est, au moins dans la majorité des cas, l'accumulation de matières organiques dans certaines conditions spéciales en rapport avec les mouvements orogéniques. Théoriquement, nous en concluons un ordre de description, dont nous commencerons par donner le cadre général et que nous nous attacherons plus tard à suivre dans nos études de détail. Pratiquement, il en résultera, d'autre part, certaines règles pour la recherche du pétrole : règles venant fortifier les constatations empiriques, en même temps que leur accord avec elles apporte une confirmation à l'hypothèse.

¹ A titre d'exemple, vers 1880, l'huile brute galicienne valait 200 à 300 fr. la tonne. Le premier développement des recherches, en 1885 et 1890, l'a fait tomber à 100 fr. en 1887, 80 fr. en 1888, 60 fr. en 1890. Puis sont venus les sondages profonds de Scho-dnitsa en 1895. La production galicienne a monté subitement de 215 000 à 340 000 t. par an. Les consommateurs manquèrent. L'huile brute tomba à 37 fr. 50. Une organisation commerciale mieux entendue la fit remonter à 70 fr. en 1901. Aussitôt la production réaugmenta et les prix s'abaissèrent : 39 fr. 50 en 1904, 30 fr. en 1905. En 1910, en Californie, la surproduction a de même fait tomber le prix des huiles lourdes de 18 fr. à 12 fr. la t.

² On cote aux Etats-Unis en dollar par baril (bb); en Russie en kopeks par pouds. 1 kopek par pouds équivaut à 1,53 fr. par tonne.

Hypothèses sur l'origine du pétrole. — L'origine du pétrole, dont il a déjà été dit un mot à propos de sa chimie¹, reste encore aujourd'hui, malgré les innombrables travaux auxquels elle a donné lieu, une des questions les plus obscures et des plus discutables entre toutes celles que nous pose la géologie. Suivant que l'on examine la question par une face ou par une autre, on est tenté d'adopter définitivement une théorie, ou arrêté par des arguments contraires, et le problème semble d'autant plus compliqué qu'on l'a étudié plus à fond.

Il en est cependant peu de plus intéressants par eux-mêmes, et peu aussi pour lesquels la solution adoptée puisse avoir de plus importantes conséquences pratiques. D'où vient le pétrole? Quand et comment s'est-il formé? Se renouvelle-t-il, ou ses ressources sont-elles limitées? et, comme conséquence directe, où faut-il en chercher des gisements nouveaux? Tels sont les problèmes que nous avons à examiner et pour lesquels nous allons proposer les solutions qui nous semblent les plus vraisemblables, sans dissimuler leur caractère souvent encore hypothétique.

Un seul d'entre eux nous paraît tellement tranché par l'observation des faits, que nous l'isolons dès à présent des autres, c'est celui qui pose la question de savoir si le pétrole d'un gisement se renouvelle ou s'il occupe un réservoir limité, rempli autrefois par un phénomène terminé (quelle que soit d'ailleurs la nature de celui-ci). La rapidité, avec laquelle se vident et s'épuisent les gisements pétrolifères — rapidité, sur laquelle nous avons assez insisté précédemment — montre, d'une manière certaine, que le pétrole est en quantité limitée dans nos terrains, et ne se renouvelle pas : ce qui différencie aussitôt ses nappes des nappes aquifères, avec lesquelles elles présentent certains traits communs que nous nous attacherons à faire ressortir, et ce qui montre également qu'il n'y a pas là apport volcanique sans cesse continué. Quant à l'origine même du pétrole, on sait que deux théories adverses ont été soutenues avec une égale vivacité : origine organique, qui va être adoptée ici, par Hunt, Krømer, Engler, etc. ; origine chimique ou volcanique par Berthelot, Daubrée, Mendéléeff, Moissan, etc.

Les arguments principaux en faveur de la théorie organique sont l'assimilation avec les combustibles, schistes bitumineux, etc., le rapprochement habituel avec les gites gypso-salifères, la fréquence des manifestations hydrocarburées sur certaines zones tectoniques n'ayant aucun caractère éruptif, le développement de longues zones pétrolifères en rapport avec certaines conditions stratigraphiques, etc.

En faveur de l'éruptivité, on peut faire valoir la présence normale des hydrocarbures dans les volcans, et l'existence de substances hydrocarburées, ou d'acide carbonique produit par leur combustion, dans de nombreux filons métallifères (quartz à bitume d'Ammeberg et de Norberg en Suède, sorte d'anhracite associée à l'argent natif de Kongsberg en Norvège). La mobilité, la plasticité, les remises en mouvement faciles des hydrocarbures, l'allure filonienne qui en résulte fréquemment pour leurs manifestations superficielles, créent, en outre, des apparences de montées internes que l'on s'est attaché à faire ressortir. Enfin, on ne doit pas dissi-

¹ Page 471.

muler que, même sur les zones pétrolifères semblant d'abord offrir l'homogénéité stratigraphique la plus nette, on se heurte à cette difficulté singulière dans l'hypothèse organique de trouver, en s'approfondissant par sondages, le pétrole dans des niveaux stratigraphiques de plus en plus anciens, souvent bien au-dessous de l'étage qu'on supposait d'abord avoir dû le fournir. La théorie sédimentaire prête par là à des objections, dont les partisans d'une origine interne ont tiré parti. Berthelot, par exemple, a fait intervenir les métaux alcalins libres, dont Daubrée admet également l'existence dans le noyau igné. Les métaux, agissant sur de l'acide carbonique venant de la surface, donneraient, d'après lui, des acétylures alcalins, qui, en présence de la vapeur d'eau et de l'hydrogène résultant de la réaction de cette eau sur les métaux libres, produiraient les pétroles, bitumes, goudrons, etc. Mendeleeff a plus simplement admis, à la suite des phénomènes de plissement du globe, l'introduction de l'eau de la surface jusqu'aux métaux carburés du noyau central : ce qui, à haute température et à haute pression, donnerait, suivant lui, des carbures saturés analogues à ceux du pétrole.

Si des expériences très douteuses de Ramsay sur la transmutation des métaux en carbone par action radioactive venaient à être confirmées, on aurait encore là une source de carbone à laquelle on devrait songer.

Discussion chimique. — Parmi les moyens de résoudre le problème, il en est un, auquel on a toujours eu recours de préférence, parce qu'on s'imaginait trouver, par lui, une solution précise et indiscutable, et que nous croyons néanmoins, en dernière analyse, incapable de nous renseigner définitivement, c'est la constitution chimique, dont il a déjà été question plus haut. Nous avons vu que les hydrocarbures dont se composent les pétroles peuvent être reproduits, soit par voie organique, soit par voie minérale. Bien que l'on ait tiré argument de certaines différences dans la proportion de ces hydrocarbures suivant les gisements, nous ne croyons pas qu'il y ait, somme toute, aucune conclusion à en déduire¹. Origine organique ou minérale, la chimie ne nous apprend qu'une chose, c'est que les deux théories contradictoires sont également admissibles.

Dans l'hypothèse organique, la chimie ne tranche pas non plus entre les animaux et les végétaux. La putréfaction des vases organisées donne certainement des hydrocarbures, comme suffirait à le prouver le gaz des marais, et la décomposition des végétaux par les bactéries (théorie Ch. Morrey) peut, même dans les profondeurs océaniques et sous de fortes pressions, réaliser des produits semblables. C'est donc, non à des expériences de laboratoire, mais à des études sur le terrain et à la pratique des champs pétrolifères qu'il faut recourir pour résoudre le problème.

Présence d'organismes. — Dans cette étude sur le terrain, il est d'abord un ordre d'observations qui semblent fort tentantes et que nous allons

¹ Voir plus haut pages 470 à 473.

néanmoins commencer aussi par éliminer : ce sont celles qui consistent à chercher, dans le pétrole même ou dans les terrains encaissants, les résidus des êtres organisés ayant pu lui donner naissance, comme on procède pour la houille. Mais ici encore nous nous heurtons à des résultats négatifs, sans que, de cette négation non plus, on puisse rien conclure. Les observations, où l'on avait cru retrouver dans le pétrole les restes de ses organismes producteurs, sont trop souvent sans valeur, comme lorsqu'on a prétendu faire provenir le pétrole de mollusques fossiles, dans les cavités desquels il s'était emmagasiné mécaniquement, ainsi qu'il pouvait le faire à côté dans un pore ou dans une géode quelconque des mêmes strates. Parce qu'un fossile est rempli de pyrite ou de silice, on n'a jamais songé à en conclure qu'il avait produit lui-même l'un ou l'autre de ces minéraux. Quoique la conclusion semble beaucoup plus vraisemblable quand il s'agit d'hydrocarbures, et quoiqu'à titre exceptionnel certaines constatations puissent être à retenir, il faut se défier d'un procédé de raisonnement, qui peut conduire également, et aussi logiquement, à de pareilles conséquences¹.

Il en est de même de la relation que l'on a parfois supposée entre le pétrole et certaines houilles ou lignites, en Pennsylvanie par exemple, simplement d'après leur vague rapprochement géographique, sans remarquer que leur zone d'extension différait et que le pétrole, situé en Pennsylvanie sous la houille, ne pouvait venir de sa distillation. D'autre part, on ne saurait invoquer, contre l'origine organique du pétrole, l'absence fréquente de ces restes, puisque le pétrole suppose évidemment une distillation très complète, très lentement accomplie pendant des périodes très longues et où ces restes ont dû disparaître et, en outre, puisque le pétrole, dans beaucoup de ses gisements, a subi un déplacement et n'occupe plus sa place primitive dans sa strate originelle.

Répartition géographique. — La répartition géographique des bassins pétrolifères n'a rien non plus de bien démonstratif, si on se borne à envisager les conditions terrestres actuelles, sans remonter, comme nous allons le faire tout à l'heure, aux conditions géologiques que l'on peut supposer avoir existé au moment où le pétrole s'est formé.

Géographiquement, on a quelquefois voulu établir une concordance entre les régions pétrolifères et les régions encore agitées par des secousses sismiques, afin de montrer que le pétrole avait été amené, ou était encore amené, de la profondeur à la suite des accidents internes dont les séismes sont un épisode. Mais, si cela est vrai pour les régions de pétrole comprises dans les terrains tertiaires, comme la Galicie, la Roumanie, le Caucase, l'Inde, la Birmanie, Java, le Japon ou la Californie, simplement parce que les régions de terrains tertiaires en général (et, en particulier, de terrains tertiaires plissés) concordent grossièrement avec les dernières zones disloquées de l'écorce, où se sont concentrés surtout les séismes,

¹ Il est évident que les accumulations de coquillages sur une côte marine n'ont aucun rapport avec la formation du pétrole. La manière dont ces coquilles se déposent vides sur nos plages actuelles suffirait à le prouver. L'absence de tout dépôt hydrocarboné dans les parties les plus riches en fossiles du jurassique français en est également la démonstration.

cela est faux pour les plus grands bassins pétrolifères des États-Unis, pour toute la zone des Appalaches, depuis la Pennsylvanie ou l'Ohio, jusqu'à la Louisiane et au Texas, pour le Kansas, pour le Colorado, pour le Canada, pour le Nord de la Russie, etc. : en résumé, pour toutes les régions où le pétrole, probablement d'âge plus ancien, se trouve emmagasiné dans des couches primaires, faisant elles-mêmes partie de voussoirs plus anciennement consolidés du globe.

A peu près nulle part, on ne trouve le pétrole en rapport avec un phénomène volcanique actuel, bien que les volcans dégagent des fumerolles hydrocarbonées. Tout au plus peut-on citer quelques cas où les hydrocarbures sont en contact assez direct avec des basaltes (région de Pont du Château en Auvergne, avec des rhyolithes (Californie) et, plus fréquemment, avec des roches vertes (ophites des Pyrénées et d'Algérie, serpentines diverses). Mais, dans la plupart des cas, ce rapprochement paraît être d'ordre purement mécanique : la présence de ces roches étant due à des dislocations qui, d'autre part, ont facilité l'ascension du pétrole jusqu'au voisinage de la superficie.

Les volcans de boue, que l'on a quelquefois regardés comme éruptifs, n'ont absolument rien de volcanique que l'apparence ; ce sont de simples dégagements de gaz soulevant un peu de boue liquide. Et, sur la plus grande partie des gisements pétrolifères, on ne constate, ni trace d'aucun phénomène volcanique, ni même une roche éruptive plus ou moins ancienne.

De même, il est difficile, malgré certaines apparences premières, d'établir un rapport général entre les zones pétrolifères et les chaînes montagneuses d'âge récent. Ce rapport, qui frappe d'abord l'attention dans certaines chaînes comme le Caucase, les Carpathes, les Apennins, les chaînes Birmanes, le Japon, les chaînes californiennes, etc., manque complètement ailleurs. On trouve du pétrole en quantités tout particulièrement abondantes dans le bassin appalachien, qui, pour la majeure partie, est une des régions les moins plissées et les moins montagneuses du globe. Le rapprochement avec les monts Appalaches, que l'on a invoqué pour expliquer cette anomalie, est si vague qu'il n'est peut-être pas un point sur la Terre qui ne se trouve de même à une semblable proximité de quelque chaîne plus ou moins ancienne. Les terrains pétrolifères du Kansas sont remarquablement plats ; ceux du Texas et de la Louisiane sont faillés, mais peu plissés. Nous serons, dès lors, amenés à interpréter autrement ce rapport apparent avec bien des chaînes montagneuses, qui n'en est pas moins un fait assez fréquent pour être retenu. Tout d'abord, il semble que ces zones montagneuses aient été, pendant de longues périodes géologiques avant leur plissement, puis, après celui-ci, sur leur bordure, des zones flexibles et mobiles, propres à l'accumulation et à la concentration des eaux lagunaires, dans des conditions qui ont pu amener le dépôt des hydrocarbures, en même temps que celui du sel. Peut-être en outre faut-il invoquer le retour en profondeur qu'elles ont d'ordinaire subi et qui a pu déterminer la distillation profonde des matières carbonées susceptibles de donner ainsi du pétrole.

Toujours dans le même ordre d'idées de rapprochements géographiques, on a fait encore remarquer, quand on voulait expliquer les

venues pétrolifères par des réactions internes en rapport avec des dislocations, que le pétrole est surtout sur la courbure externe des Carpathes, où les fractures ont dû se trouver élargies par la dilatation et non à l'intérieur comprimé de la chaîne; mais on le trouve en Galicie, dans un alignement droit, et, en Roumanie, en un point où la torsion a mis en contact des terrains redressés. Dans le Caucase, il est sur les deux versants, etc.

Tous ces faits peuvent trouver, nous allons le voir, une explication satisfaisante dans la discussion des conditions tectoniques; mais c'est à la condition de commencer par admettre, pour la formation du pétrole, comme pour la plupart des phénomènes géologiques, une loi de récurrence ayant amené, à diverses époques, dans des circonstances analogues, la répétition d'un même phénomène, dont les effets se sont modifiés différemment, suivant leur âge plus ou moins ancien, avant de se présenter à nous.

Répartition géologique. Détermination de l'âge. Remises en mouvement. Relation avec le sol. — L'âge géologique des terrains pétrolifères ne semble pas, au premier abord, beaucoup plus instructif; car il existe du pétrole dans tous les terrains possibles, depuis l'archéen jusqu'aux formations presque contemporaines. C'est souvent d'une façon tout empirique ou très vaguement hypothétique, que l'on est amené à considérer tel ou tel terrain comme ayant été, dès l'origine, pétrolifère. Nous allons voir que le pétrole, essentiellement mobile, n'appartient pas, d'ordinaire, comme la houille, à la formation où on le rencontre, mais qu'il s'y est souvent introduit postérieurement par distillation ou jaillissement, à la faveur de ses gaz, ou encore par capillarité; en sorte que, sur une même verticale, ce corps peut exister dans toutes les strates d'âge quelconque, en superposition normale ou renversée, dont la structure physique et la porosité, sous un toit imperméable, ont permis son emmagasinement.

Malgré toutes ces difficultés, nous croyons et nous allons essayer de montrer que, lorsqu'on analyse d'assez près le mode de gisement du pétrole dans une région donnée, on arrive à certaines notions sur son âge, et que ces diverses notions, malgré bien des incertitudes dans la plupart des cas particuliers, se coordonnent suffisamment entre elles dans l'ensemble pour apporter un sérieux appui à la théorie de l'origine organisée.

Le premier point à bien remarquer, c'est qu'il ne faut pas confondre les gites secondaires et adventifs de pétrole avec le gite originel. Cette observation qui, lorsqu'on se contente de l'énoncer ainsi, paraît à peu près évidente, est cependant bien souvent négligée dans la pratique, aussi bien pour le pétrole que pour les minerais, à l'occasion desquels nous aurons souvent l'occasion de la renouveler. L'observation montre qu'un sondage placé dans une région pétrolifère recoupe d'ordinaire toute une série de petites venues avant d'atteindre les niveaux principaux et que ces niveaux principaux eux-mêmes sont multipliés. La présence de l'huile minérale ne dépend pas nécessairement de l'âge des terrains traversés, comme cela se produit pour un sédiment normal, mais de leur constitution physique, plus ou moins poreuse, plus ou moins faillée, avec un toit plus ou moins

imperméable. Et, dans la même région, deux terrains d'âge totalement différent, mais de même facies, se ressemblent davantage comme richesse en pétrole, que deux terrains de même âge, mais de facies différent.

On ne saurait, dès lors, admettre que chacun de ces niveaux pétrolières représente un dépôt distinct, contemporain des couches encaissantes, comme on le ferait sans hésiter, s'il s'agissait de couches de houille. Même lorsqu'on ne voit pas comment le pétrole aurait pu passer d'une strate à l'autre, il faut se rappeler l'extraordinaire fluidité de cette substance, susceptible de filtrer à travers des vases étanchés et de suinter le long d'une tranchée où l'on n'aperçoit aucune fissure. Cette remarque est d'autant plus à retenir que la plupart des niveaux pétrolières se trouvent dans des bancs de grès poreux à grains relativement grossiers, impliquant par conséquent un dépôt assez agité, au milieu duquel on se représente mal l'accumulation immédiate de matières organiques susceptibles de donner le pétrole liquide. S'il y avait eu simple sédimentation immédiate, la place normale de ces substances organiques devrait être beaucoup plutôt dans des vases et argiles ayant formé des schistes, comme on le constate pour la houille et pour les schistes bitumineux : schistes donnant de l'huile minérale par remise en mouvement ultérieur.

Donc, comme le pétrole tend toujours à monter par suite des gaz qu'il renferme, c'est surtout à la base de la série stratigraphique à niveaux pétrolières que l'on doit chercher le ou les niveaux primitifs. Ces niveaux peuvent être multipliés ; mais il y a des chances pour qu'ils correspondent à une même phase géologique, à une période, pendant laquelle les conditions propres à la formation du pétrole se sont prolongées.

Il faut cependant ajouter (et ce n'est pas une des moindres complications du problème) que certaines zones paraissent avoir joué, pendant plusieurs périodes géologiques successives, le même rôle de synclinaux peu profonds, juxtaposés à des vousoirs anciens et, par la présence de ceux-ci, amenés à subir à diverses reprises l'influence de plissements, qui les réenfonçaient après un premier remplissage. On ne peut, par suite, nier de prime abord la possibilité que deux ou plusieurs niveaux pétrolières superposés dans des terrains d'âge tout à fait différent soient néanmoins des niveaux originels.

Remarquons-le aussitôt. Non seulement il faut chercher en profondeur l'origine première du pétrole ou de l'asphalte trouvé près du jour ; mais, souvent même il peut y avoir lieu de placer à une très grande profondeur l'origine de manifestations hydrocarburées superficielles. On peut, en effet, se demander si, parfois, le pétrole, au lieu d'exister tout formé dans une couche profonde, ne résulte pas d'une distillation souterraine, opérée par exemple sur des schistes bitumineux et rappelant ainsi l'opération industrielle par laquelle on extrait de ces schistes une huile minérale analogue au pétrole. Il faudrait alors que la profondeur fût assez grande pour amener une température susceptible d'amener cette distillation. Si cette idée était exacte, on ne devrait pas s'étonner de ne pas trouver toujours, dans les affleurements voisins, la couche hydrocarburée originelle dont on suppose ainsi la présence profonde.

Dans le même ordre d'idées, on observera que, lorsqu'on rencontre à la superficie du pétrole ou un hydrocarbure dérivé de lui comme le bitume ou l'asphalte, on n'a presque jamais l'impression qu'il soit en place dans sa strate primitive. Il semble presque toujours venir d'en bas. Et, en fait, il n'est pour ainsi dire pas un groupe de sondages placés sur un affleurement semblable qui n'ait rencontré en profondeur, à plusieurs centaines de mètres de la surface, par conséquent dans des terrains déjà tout différents, au moins quelques imprégnations, sinon de véritables niveaux pétrolifères. L'observation est si normale qu'elle a fourni un argument très séduisant en faveur d'une origine interne ¹.

Un fait qui paraît avoir une importance capitale pour la genèse du pétrole, est la relation presque constante qui existe entre le pétrole et le sel marin ou le gypse : les niveaux de pétrole, d'eau salée et de sulfate de chaux étant (quoi qu'on en ait dit) superposés dans un ordre variable. Le fait est tellement général que nous le considérons comme une indication de premier ordre dans les recherches pétrolifères et que nous nous en servons sans cesse comme d'un précieux jalon pour déterminer l'âge des gisements pétrolifères dans les cas douteux.

On peut ajouter la présence, dans de nombreux pétroles, du soufre, qui y a été laissé par la réduction des sulfates. Comme il est aujourd'hui universellement admis que le sel marin et le gypse des terrains géologiques sont un résultat d'évaporations, soit lagunaires, soit désertiques ; et comme il n'est plus, je crois, un géologue qui soutienne encore leur origine éruptive, il en résulte l'argument, à notre avis, le plus fort de tous pour l'origine sédimentaire du pétrole. Nous supposerions volontiers que ce corps a été produit par la putréfaction en vase clos de matières organiques dans un bain de saumure peu à peu concentré : cette saumure ayant pu contribuer à l'accumulation même des organismes (en même temps qu'à leur mode de décomposition), par la mort brusque des êtres vivants amenés accidentellement en ce point.

L'association des hydrocarbures avec certaines zones gypso-salines entraîne un rapprochement assez fréquent avec des ophites, diabases, etc., qui existent dans les mêmes zones, et ce rapprochement a pu sembler une indication en faveur de l'origine minérale. Nous ferons remarquer, par exemple, le cas de la zone pyrénéenne avec ses pointements à la fois ophitiques et gypseux. Il existe surtout un certain nombre de chaînes, ou cordillères, le long desquelles des roches vertes serpentineuses prennent un développement tout spécial dans des conditions d'intrusion profonde que nous n'avons pas à discuter ici. Ainsi pour cette longue cordillère qui contourne la mer des Caraïbes du Vénézuéla au Yucatan en passant par les Antilles, ou même pour celle qui suit la traversée des Indes hollandaises, ou enfin pour les Apennins. Dans tous ces cas, nous verrons les hydrocarbures apparaître en même temps, sans qu'il soit possible d'affirmer que les serpentines n'aient été pour rien dans leur venue.

¹ Comme phénomènes d'ascension actuelle du pétrole, on peut citer les makaloubes, salses, volcans de boue, etc. Les sondages qui font arriver le pétrole jaillissant à la surface ne sont que la reproduction artificielle de ce qui a dû se produire naturellement par des fractures du sol résultant d'un mouvement quelconque.

Ces remarques faites, nous tenterons bientôt une classification des zones pétrolifères par phases géologiques afin de voir leurs rapports avec la paléogéographie et la tectonique, comme nous l'avons déjà essayé pour les schistes bitumineux, sauf à rencontrer souvent bien des incertitudes. En adoptant cet ordre un peu hypothétique pour nos descriptions, nous pourrions, croyons-nous, établir une loi générale rattachant les accumulations pétrolifères, comme les dépôts de houille, comme les schistes bitumineux, comme les gites salifères, et même comme, dans un autre ordre d'idées et pour des phases différentes, les phosphates ou les sédiments ferrugineux, à certaines périodes, toujours les mêmes, des déplacements orogéniques, à des concentrations lagunaires opérées par retour transgressif des eaux sur le bord des chaînes précédemment plissées : souvent, ce semble, dans cette zone où le conflit des eaux marines et des eaux fluviales occasionne des remous, par l'effet desquels s'accumulent volontiers les matières légères et flottantes.

Conclusions théoriques. Mode de formation du pétrole. — L'idée, que nous sommes arrivés à nous faire du phénomène est, en résumé, la suivante.

Nous croyons qu'en rapport avec chacune des phases de plissement il s'est produit, le long des chaînes plissées, soit avant leur plissement, dans le géosynclinal de faible profondeur destiné à leur donner naissance, soit, postérieurement, le long de leur bordure aplanie par l'érosion et soumise à une transgression marine, des dépressions à caractère lagunaire et souvent désertique, des zones de conflit entre les eaux marines et les eaux fluviales, dans lesquelles se sont amassés des dépôts organiques, auxquels des conditions spéciales de fermentation, peut-être en rapport avec la salure des eaux, qui se traduit par le rapprochement si constant de l'eau salée et du pétrole, ont fait subir le mode de décomposition susceptible de produire les pétroles et les bitumes. Ces bassins à pétroles ou à schistes bitumineux se présentaient ainsi dans des conditions assez analogues à celles où se sont accumulés, généralement un peu plus tôt dans l'histoire géologique, des sédiments charbonneux, et l'on peut se demander si la différence entre les deux catégories de formations tient plus au mode de décomposition et de distillation ultérieure, ou à la nature des matières organiques en jeu (plutôt végétales dans le dernier cas, animales dans le premier). On ne rencontre pas, en principe, ces formations hydrocarbonées dans la zone des premiers plissements les plus intenses, qui caractérisent la chaîne proprement dite. Nous trouvons, d'ordinaire, les schistes bitumineux, qui, pour nous, en constituent un type essentiel, sur sa bordure, dans la zone où ces plissements tendent à s'affaiblir et où les terrains ont été surtout influencés par des répétitions plus récentes des mouvements, en partie postérieures au dépôt hydrocarboné, et que l'on peut qualifier de posthumes. Souvent on voit, par-dessus les couches à éléments bitumineux caractérisées par des sédiments très fins, se produire un retour de matériaux plus grossièrement classifiés, littoraux ou torrentiels, de grès passant parfois à des types grossiers ou même à des conglomérats, dont la rubéfaction fréquente doit être en rapport avec une fréquente émergence à l'air sous un cli-

mat désertique. Et ce facies désertique se trouve accentué par de nouvelles intercalations de dépôts gypseux ou salins.

Mais, en dehors de ces conditions de dépôt primitives, qui s'appliquent à toutes les matières carburées, l'un des faits les plus caractéristiques du gisement pétrolifère consiste dans la remise en mouvement que ces hydrocarbures paraissent avoir subie postérieurement et qu'on est tenté d'assimiler à la distillation industrielle des schistes bitumineux. C'est peut-être le retour en profondeur de ces sédiments hydrocarburés, réalisé de préférence le long des zones replissées, mais ayant pu avoir lieu également ailleurs par un déplacement vertical, qui a provoqué anciennement la distillation profonde des pétroles et leur introduction dans les diverses strates poreuses, où nous allons aujourd'hui le chercher. Ainsi s'expliquerait le rapport fréquent du pétrole, soit avec les chaînes de plissement, soit avec certaines roches, comme les serpentines, ophites, roches vertes, etc., dont la formation, mal expliquée elle-même, a produit des amas intercalés dans les mêmes zones, où l'on trouve : d'une part, les sédiments gypso-salins, et, de l'autre, le pétrole.

Le pétrole a dû ainsi distiller de ses couches primitives dans les couches de grès superposées à des distances plus ou moins grandes et c'est là que nous le rencontrons aujourd'hui. On reste seulement surpris quand, voyant sur un territoire aussi étendu que celui des Etats-Unis le développement des bassins pétrolifères, on essaye de calculer combien d'organismes vivants ont pu concourir à former ces milliards de tonnes de pétrole. Et l'étonnement est plus grand encore quand on applique localement un tel calcul à certains points de concentration exceptionnels. Mais ce n'est pas le seul cas où l'on soit amené à se familiariser avec des chiffres semblables, et des dépôts de phosphates, comme ceux du Sud-Est algérien, supposent également, dans les phénomènes d'origine organisée qui les ont produits, une intensité et, sans doute, une longueur de temps aussi difficiles à concevoir.

La formation pétrolifère est donc un phénomène qui, si notre théorie est exacte, doit s'être répété après chaque grande phase de soulèvement orogénique, comme se sont répétées, à la même occasion, les séries pétrographiques et métallogéniques. Et l'on peut, il est vrai, à ce propos, remarquer que les venues tertiaires de pétrole tiennent, comme nombre et comme extension géographique, sinon comme importance industrielle, une place tout à fait prépondérante sur la Terre. Cela est si net que l'on a tiré, nous l'avons dit, du rapprochement qui en résulte avec les zones volcaniques actuelles, elles aussi reliées aux chaînes plissées, un argument en faveur de l'origine volcanique. Mais il semble vraisemblable que la moindre abondance apparente du pétrole dans les formations plus anciennes est due aux mêmes causes qui font moins fréquentes dans les terrains anciens toutes les manifestations de l'activité continentale, lacustre ou lagunaire, gisements de sel, alluvions et éluvions, moraines glaciaires, restes d'animaux terrestres, etc... : à savoir les chances bien plus grandes de destruction par érosion ou par métamorphisme, auxquelles les terrains primaires ont été soumis.

Conclusions pratiques. Règles pour la recherche du pétrole. — La démonstration de la théorie précédente ne pourra résulter que de la série des faits rapportés dans nos descriptions de détail. Il n'est pas nécessaire de l'admettre pour adopter, dans la pratique, la plupart des règles suivantes, qui sont des résultats directs d'une longue expérimentation. Pour quelques-unes d'entre elles cependant, et notamment dans le cas pratiquement si important des recherches à grande profondeur, nous allons formuler les lois qui nous paraissent les plus logiques, comme si notre hypothèse était dès à présent prouvée.

Nous avons déjà fait remarquer ce point essentiel que le pétrole se comporte comme une eau sous pression, avec tendance constante à profiter de tous les orifices pour s'élever, parfois avec un jaillissement qui épuise plus vite ses réservoirs internes. Les gaz, qu'il renferme d'ordinaire, en sont la cause principale. A la différence d'une nappe aquifère, la nappe pétrolifère s'épuise et, dans le cas normal, ne se renouvelle plus, à moins de se trouver mise en relation nouvelle avec des réservoirs souterrains qui étaient précédemment séparés d'elles. Sa recherche n'est pas moins assimilable à celle des nappes aquifères, le mot nappe étant entendu avec toutes les restrictions qui semblent aujourd'hui nécessaires : c'est-à-dire qu'il n'y a pas nappe proprement dite, mais zones poreuses, ou réseau de fissures plus ou moins serré, de telle sorte qu'un puits productif peut être juxtaposé à plusieurs puits stériles et que la proportion des puits stériles dans les régions les plus prospères atteint, en moyenne, un tiers. Il s'agit de tomber sur ces zones poreuses, ou ces stockwerks de minces fissures, pour réussir.

Le point de départ d'une recherche pétrolifère est, d'ordinaire, dans un pays nouveau, un suintement hydrocarburé à la surface. Pétrole, bitume, asphalte, gaz combustibles peuvent également inciter à des sondages, dont le succès demeure, dans tous les cas, problématique. L'accumulation du pétrole en une nappe, en un réservoir souterrain assez abondant et homogène pour donner lieu à une exploitation fructueuse, dépend, à la fois, des conditions primitives de la formation hydrocarburée, et, au moins autant, de ses conditions d'emmagasinement, d'imprégnation dans les strates. On peut ajouter encore que la déperdition au jour, sous une forme apparente et susceptible d'attirer l'attention, constitue, pour le gisement profond, une cause de déperdition qui, lorsqu'elle a agi longtemps, a pu amener celui-ci à son épuisement.

La coupe des terrains destinés à être transversés par un sondage est le premier élément à envisager. Si cette coupe renferme seulement des alternances réitérées de grès durs et de schistes, les conditions sont mauvaises. Un banc épais de grès poreux sous un toit de schiste imperméable, donne, au contraire, les chances les plus favorables.

Si le terrain est plissé, une loi fondée sur la pratique très générale des sondeurs veut que les anticlinaux soient à explorer de préférence aux synclinaux. Cette loi, qui n'est pas sans comporter des exceptions, s'explique aisément par la tendance du pétrole à monter en suintant sur les flancs des plis et, par conséquent, à s'accumuler dans les voûtes, en fuyant les thalwegs. On peut ajouter que, pour rencontrer un niveau strati-

graphique déterminé à la profondeur minima, c'est évidemment sur un anticlinal qu'il faut se placer. L'application de cette loi donne lieu à la disposition des champs de sondage par zones parallèles que la plupart des plans mettent en évidence.

On discute, par contre, sur l'avantage ou l'inconvénient d'avoir un terrain très fracturé. Ces fractures, outre qu'elles gênent souvent le travail pratique du sondage, ont eu l'inconvénient d'amener une longue déperdition du pétrole à la surface. N'admettant pas la théorie d'après laquelle le pétrole serait un produit filonien apporté constamment du fond par de telles fractures, nous voyons, dans leur présence, moins d'avantages que d'inconvénients.

Enfin, la mobilité et la force ascensionnelle du pétrole ont une conséquence qu'il est essentiel d'avoir présente à l'esprit quand on songe à entreprendre une recherche de pétrole; c'est que, plus on descend profondément, plus on trouve le pétrole voisin de son niveau originel, intact et abondant. Il est évident qu'il doit y avoir (et notre théorie même le suppose) des limites à cet approfondissement et qu'il ne faut pas descendre au-dessous du niveau originel. Mais, en pratique, dans la plupart des champs pétrolifères, on n'a pas eu, jusqu'ici, à s'occuper de cette limite en profondeur et l'on a généralement gagné à descendre davantage. Presque partout, on a observé une tendance moyenne à l'enrichissement des niveaux pétrolifères à mesure que l'on faisait des sondages plus profonds: peut-être en partie parce que les niveaux supérieurs, d'où provenaient les suintements au jour, par lesquels les recherches avaient été provoquées, s'étaient trouvés de leur fait même épuisés. Souvent, en même temps, les pétroles plus profonds, moins évaporés, étaient de densité plus faible. Il est même arrivé, dans bien des cas, que l'ozocérite, le bitume ou l'asphalte superficiels aient annoncé la présence du pétrole profond. Si cela était indéfiniment vrai, il faudrait évidemment, comme nous venons de le faire remarquer, en conclure que le pétrole a une origine profonde et éruptive, ayant donné lieu à des sortes de filons-couches; mais cette conclusion, sans doute inexacte, serait, en tout cas, prématurée dans l'état actuel de nos connaissances. La suite des recherches pétrolifères en profondeur montrera plus tard exactement ce qu'il faut en penser. Les observations, faites au fur et à mesure d'un sondage sur les conditions dans lesquelles se produisent des suintements huileux, d'ailleurs inutilisables par eux-mêmes, pourront aussi apporter un précieux enseignement pour l'avenir des recherches en profondeur.

Jusqu'ici, on n'est entré encore que timidement dans la voie des recherches profondes non motivées par des suintements superficiels, et la raison que l'on en donne est que le pétrole, par sa force ascensionnelle, présente généralement, sur toutes les autres substances minérales, cet avantage de venir lui-même annoncer sa présence à l'extérieur. Cependant on ne doit pas oublier qu'au début un très grand nombre de districts pétrolifères américains ont été rencontrés par des puits destinés à chercher le sel. Plus récemment, à mesure qu'on s'est avancé vers l'Ouest américain, on s'est trouvé de plus en plus, au Kansas, dans le Territoire Indien, au Texas, etc., en face d'un manteau crétacé recouvrant les couches pétrolifères intercalées dans le primaire. On en est

arrivé alors à forer en plein crétacé, comme on le fait sur les morts-terrains du bassin franco-belge pour aller chercher en profondeur du pétrole qu'aucun indice n'annonçait superficiellement. Il est à présumer que, plus on acquerra de l'expérience, plus on s'enhardira dans ce genre de tentatives et plus on sera amené à découvrir des ressources aujourd'hui insoupçonnées.

d. — DESCRIPTION DES PRINCIPAUX BASSINS PÉTROLIFÈRES

Les ouvrages relatifs au pétrole ont tous adopté un ordre de description purement géographique, qui a des avantages, notamment pour le côté industriel de la question. Il sera facile au lecteur d'y recourir, s'il veut porter spécialement son étude sur ce point. Nous préférons, comme nous l'avons annoncé, essayer de décrire les gites pétrolifères en faisant ressortir, par l'ordre adopté, leur âge probable et les relations qui en résultent entre leurs traînées à la surface du globe et l'histoire tectonique ou stratigraphique de la Terre.

Ces relations sont, croyons-nous, jusqu'à un certain point, indépendantes des théories faites sur l'origine du pétrole. Quelle que soit la théorie admise, c'est un fait d'observation à peu près incontestable que la répartition des gisements par zones conformes aux zones tectoniques et présentant, sur chacune d'elles, une communauté d'âge probable. On peut, du reste, en conclure avec une égale vraisemblance, soit une connexion analogue à celle qui détermine les récurrences dans la sédimentation après chaque grande phase de plissement, soit un rapprochement du même genre portant sur les manifestations internes et pétrographiques. C'est par d'autres arguments que l'on est amené à incliner de préférence vers la première hypothèse.

Cette continuité approximative des zones pétrolifères va nous servir d'indice pour déterminer l'âge de certains gisements, offrant des conditions obscures. Elle saute aux yeux quand on reporte, sur une carte à échelle réduite, les innombrables points du globe où une venue hydrocarburée a été signalée. Ce serait, par contre, une erreur complète en pratique, — et une erreur grave, contre laquelle nous tenons de suite à mettre en garde — que d'assimiler cette continuité minéralogique avec une continuité industrielle et de s'imaginer pouvoir rencontrer partout des gisements riches sur une traînée dont un ou deux points se sont trouvés remarquablement prospères. En réalité, les manifestations pétrolifères de quelque valeur sont, contrairement à l'apparence première, extrêmement localisées, beaucoup plus que ne le sont les richesses en houille, quoique, pour celles-ci aussi, il existe des différences énormes entre concessions voisines¹. Outre les conditions variables du dépôt primitif, on doit faire entrer en ligne de compte l'inégalité des remises en mouvement subies par le pétrole et la dissemblance des strates rencontrées par cette remise en mouvement.

Les gisements dont il va s'agir tout à l'heure sont, avant tout, des gisements de pétrole, et ce sont les seuls pour lesquels nous donnerons ici

¹ Voir plus haut. page 484.

une étude complète et industrielle ; mais, comme nous voyons, dans les asphaltes, bitumes et gaz combustibles, des indices superficiels de nappes pétrolifères profondes, nous serons quelquefois conduits à en parler incidemment, sauf à renvoyer la description des gisements les plus importants dans cet ordre d'idées à un autre chapitre.

Les points pétrolifères, dont il pourrait être question ici, sont, d'après une remarque précédente, extrêmement nombreux ; et nous ne pourrions songer à être un peu complet sans donner à notre travail des dimensions démesurées. Ce désir d'être complet, qui pourrait avoir son utilité documentaire pour d'autres substances moins étudiées, la perd d'ailleurs ici par la possibilité qui existe de renvoyer aux ouvrages spéciaux, où la question du pétrole est traitée entièrement avec tous les détails et la bibliographie désirables. Il nous a paru plus utile de chercher à mettre en évidence les caractères généraux et les rapprochements, qui peuvent être utilisés dans l'étude théorique du pétrole comme dans les applications pratiques.

Nous classerons donc les champs pétrolifères, ou les plus importants, ou les plus instructifs, avec les schistes bitumineux que nous croyons connexes, dans l'ordre suivant :

α. Couronne boréale des plates-formes primitives. Dépôts siluriens ou dévoniens — Canada, Ohio-Indiana, Illinois et bassin des Appalaches, Kentucky, Kansas et Lacs Canadiens ; Mer Blanche, Volga, Baïkal.

β. Chaîne hercynienne. — Schistes bitumineux divers (déjà étudiés). — Pétroles et bitumes, peut-être d'origine triasique, situés dans les Pyrénées, le Gard, les Alpes et le Jura, etc..., en Allemagne (Hanovre et Brunswick), en Algérie.

γ. Chaînes créacées ou tertiaires. — En Amérique, zones créacées du Colorado, Wyoming, Utah, Californie, Texas, Mexique, Cuba, Haïti, Barbades, Trinidad, Vénézuëla, Colombie, Pérou, Argentine. — En Eurasie, Plateau Central, Alsace, Tyrol, Galicie, Roumanie, Apennins et Sicile, Albanie, Caucase, Turkestan, Mer Morte, Egypte, Mésopotamie, Perse, Birmanie, Sumatra et Java, Japon.

α. — PÉTROLES PRIMAIRES DES ÉTATS-UNIS, DU CANADA ET DE RUSSIE

Distribution générale. — On sait, et nous avons déjà eu plus d'une occasion de rappeler, que, dans notre hémisphère, les plissements se sont peu à peu reportés, par une localisation croissante, du pôle vers l'emplacement actuel de notre Méditerranée et de l'ancienne Mésogée. En rapport avec ce déplacement on trouve une première zone de manifestations pétrolifères, qui suit le bord des grandes plates-formes primitives septentrionales, généralement entre celles-ci et les zones des plissements hercyniens venus plus tard, dans une partie de la plate-forme où se sont produites, avec des caractères lagunaires ou continentaux, les transgressions siluriennes et dévoniennes. Nous signalerons plus tard un rapprochement du même genre entre d'autres bassins hydrocarburés et les massifs hercyniens ; puis, entre d'autres encore et les chaînes créacées ou tertiaires. C'est ainsi que nous nous trouvons conduits à commencer notre étude par la plus grande zone pétrolifère du monde, celle

du Nord-Est américain. Nous allons voir le pétrole s'y présenter dans une série de strates perméables ou fissurées pouvant s'étendre du silurien supérieur au sommet du carbonifère, avec localisation des bassins les plus riches dans un certain nombre de bancs gréseux, situés vers le sommet du dévonien et la base du dinantien.

On a souvent décrit le Bassin des Appalaches comme renfermant uniquement du pétrole dévonien ou carbonifère très inférieur. Cela est vrai dans quelque mesure pour les centres les plus anciennement fameux, à la condition de regarder comme occupant encore sa position primitive une huile minérale qui, suivant toutes vraisemblances, vient de strates plus profondes. Mais, il est impossible de négliger les autres districts très nombreux, où le pétrole est encaissé dans le silurien et, s'il fallait imaginer une origine unique pour tout le pétrole de l'Est américain (ce qui n'est ni démontré ni même probable), c'est au moins dans le silurien, et non dans le dévonien, qu'on devrait aller la chercher.

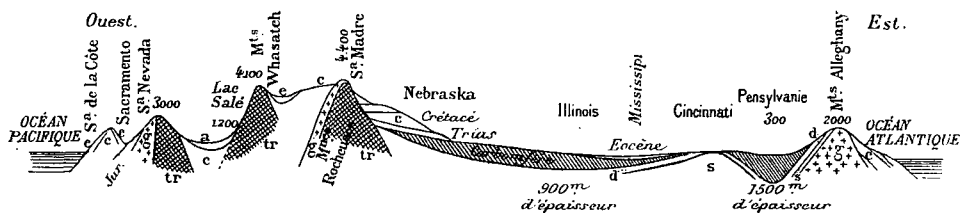


Fig. 60. — Coupe transversale schématique des Etats-Unis.

Quand on se reporte à l'histoire tectonique de la région, on voit, comme nous avons essayé de l'expliquer ailleurs¹, que de premiers plis archéens et précambriens ont été recouverts par des transgressions, dont l'âge, variable suivant les régions (cambrien au Lac Supérieur, silurien supérieur au Nord, dévonien dans le Nord-Ouest, etc.) explique peut-être en partie les périodes différentes de l'histoire géologique, auxquelles on est amené, suivant les régions, à faire remonter les venues pétrolifères : celles-ci ayant apparemment quelque rapport avec ces transgressions. Puis il s'est produit, sur une partie de ces dépôts primaires, des mouvements de plissement successifs, dont les deux principales étapes ont eu lieu : avant le dévonien, dans la presqu'île de Gaspé et les Green Mountains ; pendant le westphalien, à Terre-Neuve, dans le nouveau Brunswick, dans les Appalaches, etc. Et ces mouvements, qui ont dû se répéter pendant de très longues périodes, avec un faible dernier écho tertiaire, ont déterminé une série de rides, à peu près parallèles les unes aux autres, qui, partant des Monts Appalaches à l'Est avec une grande intensité, s'étendent, en s'atténuant de plus en plus, presque indéfiniment dans le sens de l'Ouest. Il semble que, dans la zone comprise entre les principaux plissements et la plate-forme solide, on ait eu, pendant le silurien, le dévonien et peut-être le début du carbonifère, des bassins de

¹ Voir la *Science géologique*, ch. xi, p. 401 et pl. 1 (systématisation des plissements sur une mappemonde).

sédimentation instables à concentrations lagunaires avec conflit fréquent des eaux marines et des eaux fluviales, des zones d'approfondissement progressif admirablement disposées pour recevoir d'abondants sédiments terrigènes, où, dans certaines circonstances favorables, se sont faits, d'abord des dépôts de sel abondants, puis des sédiments hydrocarburés



Fig. 61. — Carte d'ensemble des pétroles nord-américains.

d'origine organique, destinés à fournir le plus grand réservoir pétrolifère et, dans la suite, la plus grande accumulation de houille du monde.

Nous allons tout à l'heure suivre du Nord au Sud les riches zones pétrolifères de l'Est-Américain. Quand on en cherche l'emplacement sur une coupe tout à fait schématique comme celle de la figure 60, on voit que ces districts pétrolifères suivent la ride anticlinale qui fait reparaitre le silurien à Cincinnati : une première zone immédiatement à l'Ouest sur le silurien même (Ontario au Canada, Ohio et Indiana); une seconde, à

l'Est, dans les terrains plus récents, dévoniens ou carbonifères, accolés à la zone plissée du houiller productif et subissant de plus en plus l'effet de ces plissements à mesure que l'on gagne vers l'Est. Dans l'intervalle, sur la voûte même de ce grand anticlinal, il existe encore des indices hydrocarburés, et notamment des gaz combustibles, mais pas de gites utiles. Rien absolument ne prouve que ces deux zones parallèles soient originellement du même âge.

Il nous semble, au contraire, vraisemblable, que les formations pétrolières ont dû, ainsi que les formations salifères, suivre les progrès d'une transgression, qui ne s'est pas faite simultanément sur d'aussi vastes étendues. Mais nous croyons peu à de nombreux niveaux multipliés, indépendants les uns des autres, qui se seraient répétés sur le même point dans le bassin des Appalaches, pendant toute la durée des temps primaires, chaque fois qu'il se reproduisait une couche sableuse. Nous allons voir les étages géologiques les plus divers se montrer pétrolières dès que des sondages y sont faits assez profondément pour rencontrer des strates perméables : que ce soient des calcaires fissurés et caverneux comme dans le Lima-Ohio, ou des grès poreux comme en Pennsylvanie. Cette observation conduit à se demander si tout ce pétrole n'est pas venu originellement de plus bas et ne correspondrait pas, par exemple, aux premiers sédiments transgressifs d'âge quelconque ayant passé sur la plate-forme primitive après ses plissements archéens, précambriens ou siluriens, en se rattachant ainsi à une série de dépôts lagunaires, dont les sels siluriens d'Onondaga et les sels dévoniens de la baie d'Hudson sont les exemples les plus marquants.

Nous étudierons d'abord la trainée hydrocarburée qui commence au Nouveau Brunswick et va dans la direction du Sud-Est (Lima-Ohio, Illinois). Nous prendrons ensuite la trainée plus orientale qui comporte le bassin des Appalaches, le Kentucky, le Tennessee, et nous remonterons, avec elle, sur la bordure Ouest de la plate-forme par les Territoires Indiens, l'Oklahoma et le Kansas¹, vers les lacs du Canada (fig. 61).

Presqu'île de Gaspé et Nouveau Brunswick (Canada). — Dans la région Est du Canada, que nous abordons ainsi la première, la *presqu'île de Gaspé* se distingue de la plate-forme primitive par des plis affectant jusqu'au silurien, qui semblent y représenter un tronçon calédonien. Une série d'anticlinaux, qui influencent ces grès du silurien supérieur, montrent des suintements pétrolières nombreux, sur lesquels on a foré sans succès, en 1865 et 1889, une cinquantaine de puits.

De la presqu'île de Gaspé, la connexion tectonique nous conduirait directement aux Green Mountains, qui sont également un tronçon de chaîne calédonienne, et à l'Etat de New-York. Mais nous voulons auparavant dire quelques mots, pour n'avoir plus à y revenir, de la région située plus à l'Est dans le *Nouveau Brunswick* et la *Nouvelle Écosse*.

Ici c'est d'une chaîne hercynienne qu'il s'agit. Comme dans notre Pla-

¹ La limite probable de la plate-forme primitive (fig. 61) est marquée à l'Est par les Adirondacks et les Appalaches. Elle se recourbe au Sud, vers Jackson, avec une direction E. W., en empiétant légèrement sur la Louisiane et le Texas, atteint le Nouveau-Mexique et remonte, avec une direction N. S., en suivant à l'Est la chaîne de Laramie.

teau Central, on a un soubassement de gneiss et terrains primaires (jusqu'au carbonifère inclus) affecté par ces plissements dont le prélude avait établi déjà antérieurement des discordances avant le silurien et avant le carbonifère. Des terrains houillers se sont déposés dans un certain nombre de bassins synclinaux, où ils ont été replissés, après coup : à l'Ouest de Terre-Neuve, au Nouveau Brunswick, etc. Le trias, à l'état de grès rouge, repose en discordance par-dessus. Certains de ces bassins présentent des cannelcoals, des schistes bitumineux, etc. On trouve, en même temps, et c'est pourquoi nous en parlons ici, quelques indices bitumineux et pétrolifères.

Le cas le plus curieux à cet égard, est celui d'un filon formé d'une substance dite albertite, qui a été exploité dans la Nouvelle Ecosse, à *Albert*, jusqu'à sa disparition par coïncement à 450 m. de profondeur. Ce filon était encaissé dans un calcaire bitumineux, renfermant, paraît-il, de nombreux restes de poissons fossiles. On y trouvait un corps intermédiaire entre le charbon et le bitume, tenant 30 p. 100 de carbone fixe et 61 p. 100 de matières volatiles, dont on a retiré 200 000 t. pour enrichir le gaz d'éclairage, comme on le fait avec les bogheads.

En 1910, le Nouveau Brunswick a produit 191 t. de pétrole.

Dans le reste de la Nouvelle Ecosse, on connaît également, en divers endroits, des indices hydrocarburés et, dans la presqu'île de *Cap Breton*, il y a des schistes bitumineux abondants.

Si nous revenons maintenant vers le Sud-Est, nous voyons apparaître, vers le 43° et le 44° degrés, dès que l'on sort du massif archéen pour aborder les sédiments primaires, les premières manifestations des grands bassins de l'Ohio et de la Pennsylvanie. On a (fig. 62) deux traînées principales N.-E. S.-W. qui se dessinent nettement sur une carte, l'une à l'Ouest, l'autre à l'Est du lac Erié, toutes deux parallèles aux plis des Appalaches et séparées par une zone de 250 km., dans laquelle il existe bien encore quelques indices pétrolifères, mais faibles et très disséminés.

Les terrains où on y rencontre le pétrole vont depuis le sommet du carbonifère (série de Monongahela (16), en Virginie Occidentale¹), jusqu'à la base du silurien (calcaire de Trenton (3) dans l'Ohio-Indiana), avec tendance expliquée plus haut à s'approfondir à mesure que l'on s'éloigne des Appalaches dans le sens de l'Est à l'Ouest et prédominance très marquée de niveaux dévoniens supérieurs ou dinantiens (7 à 11) dans la zone occidentale la plus prospère (New-York, Pennsylvanie). L'origine du pétrole peut difficilement être cherchée plus haut que le silurien supérieur, où le groupe salifère d'Onondaga (4) semble bien indiqué, en raison du rapprochement constant entre le sel et le pétrole sur lequel nous avons précédemment insisté et, localement, elle paraît encore plus profonde.

On peut être tenté d'en conclure que la formation du pétrole se serait faite successivement en sens inverse, de l'Ouest à l'Est, à mesure que les mouvements orogéniques se seraient reportés et localisés dans ce sens, comme nous savons que ce fut leur tendance générale. Il

¹ Voir, dans la coupe de la page 504, le sens local des chiffres (16) employés pour ce paragraphe.

y aurait eu ainsi une échelle de dépôts hydrocarburés commençant avec le silurien salifère d'Onondaga à l'Ouest du lac Erié et se continuant jusqu'à une époque indéterminée en Virginie. Les gisements du Texas ou du Kansas, que nous étudierons ultérieurement, représenteraient, après une phase de repos, la récurrence (plus récente) des mêmes phénomènes dans une zone périphérique. Il ne faut toutefois pas oublier que chaque détermination d'âge pour un niveau pétrolifère constitue seulement, en raison de ses remises en mouvement, une limite d'âge supérieure et que toutes les indications suivantes peuvent être, par suite, à vieillir : les plus récentes dans une proportion impossible à apprécier. Nous donnons ci-joint, pour permettre de suivre les descriptions suivantes, une coupe générale du primaire Nord-américain.

COUPE DU PRIMAIRE DANS LA RÉGION PÉTROLIFÈRE NORD-AMÉRICAINNE

Permien stérile. (16)	} Série de Monongahela.
Houiller productif (coal measures) Stéphanien et Westphalien (12, 13)	
Subcarbonifère américain ou anthracifère Dinantien (11)	} Terrain productif de Pittsburg (Upper coal measures). Terrain stérile. Terrain houiller inférieur (série de l'Alleghany). Lower coal measures de l'Illinois et de Pennsylvanie. Conglomérats de Pottsville. Schistes rouges de Maunch Chunk, avec quelques couches calcaires. Grès de Pocono. Berea grit <i>pétrolifère</i> de Butler.
Dévonien sup. Famennien (10, 9)	
Dévonien moy. Givétien, Eifelien (8, 7)	} Grès rouge de Catskill (grès <i>pétrolifères</i> de Venango). Chemung et Portage (grès <i>pétrolifères</i> de Warren, Bradford, Mac Kean, etc. Schistes bitumineux de Genesee et calcaire de Tully.
Dévonien inf. Coblentzien, Gédinnien (6, 5)	
Silurien sup. Gothlandien (4)	} Groupe salifère d'Onondaga, calcaire du Niagara. Grès de Clinton et de Médina.
Silurien inf. Ordovicien (3)	
Silurien inf. Cambrien (2)	} Calcaire de Cincinnati et schistes d'Hudson River. Schistes d'Utica, calcaire de Trenton. <i>Pétroles</i> de l'Ohio. Grès de Potsdam et de Québec.

Ontario (Canada)¹. — La trainée occidentale du Nord-Est américain,

¹ 1863. BOILEAU-GAULDRÉE. *Mém. sur les pétroles du Canada* (Ann. d. M. (6^e), t. 4, p. 105). — 1887. BELL. *The petroleum field of Ontario* (Proc. a. tr. roy. Soc. of Canada, t. 4, p. 99. Montréal).

comprend, dans la région située entre les deux lacs Huron et Érié, tous les gisements pétrolières du Canada, séparés, par une barrière purement politique et conventionnelle, de ceux des États-Unis. Elle se continue dans



Fig. 62. — Carte des gisements pétrolières Est-américains. Les chiffres (12), qui se rapportent à la coupe de la page 504, indiquent le niveau géologique le plus profond où on a rencontré le pétrole. Echelle au 1/16 650 000^e.

le bassin de Lima-Ohio et de l'Indiana (fig. 62) Nous y trouverons du pétrole dans des niveaux particulièrement anciens (silurien ou dévonien inférieur) et, en même temps, ce pétrole s'y présentera, en général, avec tendance ascensionnelle manifeste, non pas dans des grès ou sables comme nous le verrons plus tard en Pennsylvanie, mais dans des calcaires fissurés.

Les pétroles du Canada sont situés dans une région très restreinte de la province d'Ontario, où leurs centres d'extraction fructueux sont encore plus localisés, tout à fait au S.-W. dans les districts d'Enniskillen, Dawn et Lambton. Après avoir été un moment florissant vers 1862, ce district a oscillé, de 1890 à 1900, entre 90 000 et 100 000 t., puis s'est abaissé peu à peu. Malgré un retour momentané de prospérité en 1907, la production est aujourd'hui inférieure à 40 000 t.

Les points les plus productifs sont Lambton (26 450 t. en 1910), Tilbury and Romney (8 100 t.), Bothwell (4 900 t.). Les districts de Pétrolia et d'Oil Spring, qui produisaient respectivement 36 000 t. et 10 000 t. en 1904, sont à peu près épuisés.

Les terrains de cette région, qui ont un léger plongement vers le Sud, partent, au sommet, du dévonien pour descendre jusqu'à l'archéen. Le pétrole a été rencontré surtout dans le « calcaire cornifère » du dévonien moyen (corniferous limestone) (7), à un niveau plus bas que les pétroles de Pennsylvanic. Il a une densité de 840 à 870 et une forte teneur en soufre (jusqu'à 2,5 p. 100). On a insisté autrefois sur l'abondance des débris organisés qu'il renferme. Des coupes sembleraient montrer l'existence d'eau salée au fond des synclinaux, dans les mêmes couches dont les anticlinaux donnent du gaz au sommet et du pétrole sur les flancs.

Bien que ce district soit anciennement connu, on s'y est, en moyenne, fort peu enfoncé : environ de 50 à 120 m. à Pétrolia et Oil Spring. A peine dans quelques puits est-on descendu à 450 m. On a trouvé alors, sous le calcaire cornifère (7), les couches d'Onondaga siluriennes (4), avec deux bancs de gypse atteignant chacun 80 m. d'épaisseur et des couches de schistes avec sel. Ces puits n'ont pas donné de résultat pour le pétrole ; mais les terrains gypso-salifères rencontrés correspondent bien à l'idée que l'on peut se faire sur les conditions originelles des dépôts hydrocarburés, qui devraient alors être rattachés au sommet du silurien.

La caractéristique actuelle de ces puits canadiens est d'être, en moyenne, fort peu productifs (à peine un cinquième de baril par puits et par jour) et de rencontrer abondamment des eaux salées et sulfureuses. Vers le Nord, les indications se prolongent jusqu'au voisinage de Collingwood, sur la Georgian Bay, où il existe des schistes calcaires bitumineux contenant 12 p. 100 de matières volatiles (autrefois exploités) et où divers puits ont donné des quantités notables de gaz. Dans l'Ouest, sur les bords du lac Huron, de puissantes couches de sel ont été rencontrées dans le comté de Huron et à Goderich (37,50 m. de sel en six couches en ce dernier point).

Les gaz combustibles ont été exploités en divers points de la province d'Ontario, mais d'une façon très précaire. On en connaît au Nord jusqu'à Caledonia Spring sur le Pacific Canadian entre Montréal et Ottawa. Les exploitations ont eu lieu surtout dans la péninsule du Niagara (comté de Welland), sur le prolongement de la zone pennsylvanienne, où ils alimentent la ville de Buffalo et à l'extrémité Ouest du lac Erié, près de Kingsville dans le comté d'Essex, sur le prolongement de la zone Toledo-Findley dans l'Ohio, où ils ont été abondants.

Ohio et Indiana (Lima). — Le prolongement manifeste de la zone pétrolière, que nous venons d'étudier sur le territoire canadien, se trouve, aux Etats-Unis dans l'angle N.-W. de l'Ohio et dans l'Indiana, sur les comtés de Williams, Henry, Wood, Sandusky, Seneca, Hancock, Allen, Mercer, etc. (fig. 62). Le pétrole de cette région présente, avec celui du Canada, examiné plus haut, cette analogie d'être très fortement sulfureux, au point de rendre son raffinage difficile. Il est également d'un âge ancien. On a commencé là par chercher des gaz entre Toledo et Findlay, comme sur la rive Nord du lac Erié, à Kingsville. L'exploitation du pétrole lui-même n'a commencé qu'en 1885, et s'est progressivement étendue pendant vingt ans. De 1894 à 1904, on a foré en moyenne 3 000 puits par an, dont un dixième improductifs. La production, du bassin, qui s'était un moment élevée à 25 000 000 barils en 1906, a subi, depuis, une chute rapide jusqu'à 7 300 000 barils en 1908 et 5 171 000 en 1910¹.

Les couches de cette région ont généralement une stratification assez régulière avec des plissements N.-E. à larges ondulations. Un anticlinal principal, dit de Cincinnati, fait apparaître, à l'Est de Columbus, une zone de terrains siluriens comprise entre deux bandes carbonifères. C'est sur cet anticlinal silurien, que se trouvent les champs de pétrole. Les terrains traversés par les forages partent, en moyenne, du dévonien inférieur (5) pour atteindre, sous un manteau imperméable formé par les schistes d'Utica (3), les calcaires de Trenton ordoviciens (3), où se rencontre le pétrole. La présence du pétrole dans ce calcaire est directement en rapport avec les vides qu'il présente. Là où il a subi une dolomitisation qui l'a en même temps rendu poreux, le pétrole y abonde. S'il est resté calcaire, il est pauvre ou stérile.

Par exemple, dans le comté de Wood qui a été longtemps le plus productif dans ce bassin, les sondeurs savaient que la présence du pétrole était liée à l'existence de calcaires crevassés et caverneux.

Ce pétrole vient donc de plus bas sans qu'on ait le moyen de préciser.

La relation avec les anticlinaux à larges ondulations que présente le calcaire de Trenton est, d'autre part, très nette.

Vers 1891, les puits de l'Ohio étant asséchés, l'industrie a commencé à se reporter vers l'Ouest dans l'Etat de l'Indiana où, de 1902 à 1910, l'on a foré 3 à 4 000 puits par an, dont un dixième stériles, avec une production moyenne de 22 barils par puits et par jour. Les conditions de gisements sont les mêmes et le pétrole se retrouve dans le calcaire de Trenton (3). En 1902, dans le comté de Delaware, où la plupart des puits étaient secs, on a foré 60 m. plus bas et trouvé un nouvel horizon, dont certains puits ont donné jusqu'à 1 000 barils par jour.

Illinois. — La traînée de l'Ohio N.-W. a son prolongement, à travers l'Indiana, dans l'Illinois.

La production de cet Etat est toute neuve. En 1905, on a produit, pour la première fois, 181 000 barils. En 1908, on a atteint 33 685 000; en 1910, 32 984 000. Ce champ pétrolière, dont le centre est à Casey (comté de

¹ Les évaluations américaines sont données en barils (bbl) de 129 kg.

Clark), s'étend, le long de la frontière de l'Indiana, de Westfield (Clark) à Oblong (Crawford) à hauteur de Terre Haute dans l'Indiana qui est exploité depuis longtemps. Les puits ont une profondeur moyenne de 200 m. En 1910, sur 2 139 puits forés, on en a eu 1 671 de productifs, avec une production moyenne de 55 barils par jour.

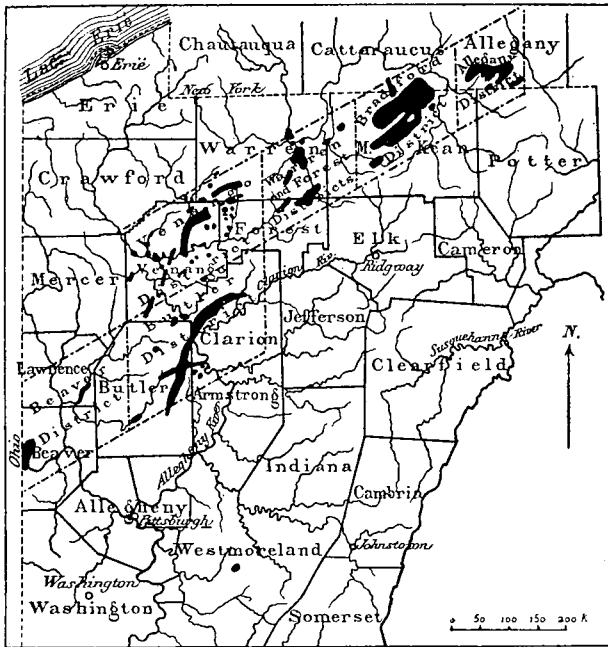


Fig. 63. — Carte du bassin pétrolier Pennsylvanien.

Bassin des Appalaches¹. — Le bassin des Appalaches, dont nous avons suffisamment rappelé plus haut le rôle prépondérant dans l'industrie

¹ 1862. GAULDRÉE BOILEAU. *Rapport sur l'exploit. de l'huile minérale dans l'Amérique du Nord* (Ann. d. M., 6^e série, t. 2, p. 93). — 1867. STERRY-HUNT. *Sur les pétroles de l'Amérique du Nord* (B. S. G. F., 2^e série, t. 24, p. 370). — 1869. FOUCOU. *Le pétrole et les hommes d'huile de l'Amérique du Nord* (R. d. d. M., avril). — 1870. BLASS. *Geschichte, Industrie und chemische Zusammensetzung des Amerikanischen Petroleum* (Arch. der Pharm., t. 191, p. 50). — 1870. BURKART. *Ueber die Produktion von Petroleum in Nord-Amerika* (B. u. H. Z., p. 373; Polyt. Centralblatt, 1871, p. 143; W. B., p. 697). — 1872. LESLEY. *Record of fourteen oil Wells at Brady's Bend, Armstrong county, Pennsylvania* (Proc. Am. Philos. Soc., t. 12, p. 562). — 1873. FOOTE. *Discovery of petroleum in Pennsylvania* (Amer. Chimist., t. 3, p. 174). — 1875. WRIGLEY. *Petroleum region of western Pennsylvania* (2 planches), first Annual Report of the second Geol. survey Pennsylvania, B. u. H. Z., t. 3, 1876, p. 137; W. B., 1876, p. 114). — 1876. BOURGOGNON. *Pennsylvania petroleum* (Amer. Chim., t. 7, p. 81). — 1876. SADTLER. *On the chemical composition of Pennsylvania petroleum* (Amer. Chim., t. 7, p. 181; W. B., 1877, p. 1038). — 1876. SMITH. *Puits de gaz en Pennsylvanie* (An. Ch. et Ph., (5), t. 8, p. 566; B. S. C. P., 1877, n° 3; Pr. I. Civ. En. London, t. 46, p. 955; Chemisches Zentralblatt, 1876, p. 606; W. B., 1876, p. 1178). — 1877. HENRY. *Sur le pays de l'huile*

pétrolifère, commence dans le Sud-Ouest de l'État de New-York, traverse la Pennsylvanie, l'Ohio et la Virginie Occidentale dans la région où ces trois États sont contigus et se termine dans le Kentucky (fig. 62 et 63). L'industrie y a pris son essor depuis 1860 et, dans les seuls états de Pennsylvanie et de New-York, on évalue à environ 700 millions de barils, ou 90 MT, la production depuis l'origine. On peut ajouter, pour la Virginie occidentale, 200 millions de barils, ou 25,8 MT.

Dans ces dernières années, un fléchissement très marqué, mal compensé par l'entrée en jeu de districts nouveaux, a montré que ce bassin tendait vers son épuisement. On estime, au total, que, sur 75 000 forages exécutés en Pennsylvanie, un tiers n'a pas réussi.

Géologiquement, la région comprend du dévonien et du dinantien, avec des bassins plus localisés de houiller productif (westphalien ou stéphanien). Ces terrains ont subi des plissements partant de l'Est, qui s'atténuent progressivement à mesure qu'on s'écarte vers l'Ouest de la chaîne des Appalaches. Nous avons déjà fait remarquer combien les quartiers vraiment riches étaient localisés, même dans un tel bassin. Leur présence correspond, en général, à l'existence d'un certain nombre de niveaux gréseux (dits improprement sables par les sondeurs) et moins réguliers qu'on ne l'affirme d'habitude, où l'emmagasinement du pétrole est évidemment un effet de la porosité et dont les conditions physiques plus ou moins favorables ont, suivant les points, permis des accumulations d'huile plus ou moins fortes et régulières.

On appelle parfois « District des Sables noirs » (Black Sands), les bassins de Bradford et Alleghany, où les sables sont sombres et généralement fins, et « District des Sables blancs » ou White Sands, la partie Sud du comté de Mac Kean, où les sables sont gris verdâtre et parfois grossiers et caillouteux.

Les niveaux gréseux pétrolifères, dont le nombre varie entre 3 et 8 suivant les points, sont situés dans le dinantien inférieur (11) et le dévonien supérieur (10). On les a recoupés par approfondissements successifs à mesure que les niveaux supérieurs s'épuisaient, traversant chaque fois,

dans l'Amérique du Nord (Ind. Min., Compt. Rend., août). — 1877. HORNECKE. *Das Petroleum in den Vereinigten Staaten* (Hübners Z., n° 7, p. 21; W. B., p. 1043). — 1877. MARTINS. *Die Amerikanische Petroleum Industrie* (Berlin). — 1878-79. ASHBURNER. *Oil well records in the northern or Bradford oil region, Pennsylvania*. — 1878. HENRY. *Note sur le pays de l'huile de l'Amérique du Nord* (Bull. Soc. Ind. min., 2^e série, t. 7, p. 135. Saint-Etienne). — 1879. WRIGLEY. *Etat et avenir des pétroles de Pennsylvanie* (Eng., t. 28, p. 164). — 1886. E. ORTON. *Petroleum and natural gas as found in Ohio* (Science, t. 7, S. 560. New-York). — 1886. ASHBURNER. *The product. and exhaustion of the oil regions of Pennsylvania and New-York* (In-8°, 40 p.). — 1886-1887. Publications diverses de Ashburner, Carl, Lesley, Wrigley dans le Geological Survey of Pennsylvania. (Le volume de 1886 (*Oil and Gas region*) contient une très longue bibliographie du pétrole.) — 1887. C. ASHBURNER. *Geologic distribution of natural gas in the United-States* (In-8°, 32 pages, Saint-Louis). — 1887. CREW. *Practical treatise of petroleum* (London). (Sampson Low and Co.) — 1889. N.-H. WINCHELL. *Natural gas in Minnesota* (The geological and natural history Survey of Minnesota. 17th rapp., p. 39, Saint-Paul). — 1896. RICHE et ROUME. *Industrie du pétrole aux Etats-Unis* (Ann. d. M., 9^e, t. 5, p. 67-130). — OLIPHANT GRISWOLD ELDRIGE ARNOLD. *Travaux divers* dans le U. S. Geol. Surv. — 1908. G. P. GRIMSLEY. *A history of Petroleum and Natural Gas Develop. in the U. S.* (Carnegie Inst.). — 1909. G. P. GRIMSLEY. *Nord Amerika* (dans Engler et Höfer, *loc. cit.*, S. 577). — TASSART, *loc. cit.*

entre deux bancs de grès porceux pétrolifères, une épaisseur de schistes stériles¹.

En même temps, on trouvait de l'huile de plus en plus légère. On a donc toutes raisons de croire que ces niveaux présentent entre eux une connexité et représentent des imprégnations adventives en rapport avec une même formation plus profonde. On a pu cependant les considérer également comme des strates indépendantes, à la façon de couches de houille, la présence des schistes intermédiaires étant réputée un obstacle à leur communication. Nous donnons, par exemple, ici (fig. 64), la coupe schématisée de la région de Pittsburg, avec les trois niveaux d'huile dévoniens séparés les uns des autres par deux épaisseurs de schistes de 100 m.

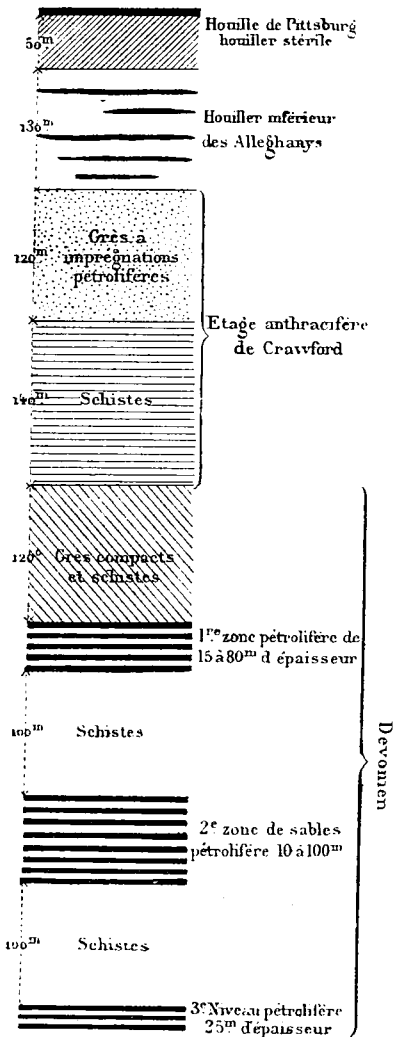


Fig. 64. — Coupe des terrains pétrolifères de Pennsylvanie.

de Venango, Butler et Beaver ; région du Sud-Ouest, ou de Washington. Après quoi viennent le bassin de la Virginie Occidentale et celui de l'Ohio Sud-Est.

¹ On a quelquefois cherché l'origine du pétrole dans les schistes bitumineux à ganoides situés à la base du grès de Chemung (district de Bradford) ; mais il faut alors supprimer un schiste semblable au-dessous de chacun des niveaux gréseux à l'huile minérale.

En 1884, les deux premières nappes pétrolifères du dévonian donnaient, dans les comtés de Warren, Bradford, etc., chacune 16 000 barils par jour ; le troisième 34 000 barils après avoir atteint un moment, en 1881, 83 000 barils.

Malgré la régularité relative de ce bassin, il ne faut pas, d'ailleurs, s'imaginer des nappes continues sur de vastes régions, mais des filets, ou réseaux de fissures localisées, dont le système plus ou moins serré laisse toujours passer au moins un dixième de puits stérile, et même en moyenne un tiers dans l'ensemble de ces districts réputés très productifs.

On distingue ordinairement, dans le bassin des Appalaches, quatre parties : District de Bradford ; Middle country (région moyenne), ou District de Warren and Forest ; Lower Country (région basse, ou districts

Nous allons les examiner rapidement du Nord au Sud (fig. 63).

Le *district de Bradford* exploite surtout un niveau, dit troisième sable, situé à environ 525 m. de profondeur, sous les couches de Chemung du dévonien supérieur (10). La production moyenne des puits dans leur première année d'existence y était de 20 barils par jour en 1880 ; elle est descendue progressivement à 3,43 en 1904.

Le *Middle Field* s'étend sur les comtés de Warren, Forest et le Sud-Ouest du comté de Mac Kean. Dans le comté de Warren, le district célèbre de Cherry Grove a donné un moment, en 1882, 50 000 barils par jour, puis a décliné rapidement. La profondeur moyenne, dans ce district, est de 300 m. L'huile y est réputée de qualité supérieure et parfois même directement utilisable à l'éclairage.

Le *Lower Field*, qui comprend les districts de Venango, Butler et Beaver, commence au Nord par la région bien connue de Titusville et Oil-City, où ont été faits quelques-uns des sondages les plus anciens. Le bassin pétrolifère compris, un peu plus au Sud, dans les comtés de Butler, Clarion et Armstrong, a fourni la presque totalité du pétrole américain de 1869 à 1877.

Le champ autrefois important de *Smith's Ferry*, au point où la rivière Ohio sort de l'Etat, a d'abord fourni du pétrole dans les grès westphaliens (12) de Pottsville : puis on est descendu dans le Berea grit dinantien (11), qui correspond au grès de Pocono. Une trentaine de mètres au-dessous du Berea sand a été rencontré en 1886, à Shannopin, un peu plus à l'Est, le niveau le plus productif, dont certains puits, en 1886, donnèrent 400 à 2 000 barils par jour. Ce champ de Shannopin était, contrairement à la règle des anticlinaux, qui rencontre ici beaucoup d'exceptions, situé sur le flanc et sur le fond d'un synclinal peu profond.

Enfin le district de *Washington* et de *Green* contient le champ de Mac Donald, découvert en 1891, qui a donné, à lui seul, un moment 80 000 barils par jour.

Les champs pétrolifères de la *Virginie occidentale* contiennent actuellement environ 15 000 puits. Là, comme en Pennsylvanie, on a commencé par exploiter le sel avant d'utiliser le pétrole qu'on avait reconnu de bonne heure lui être associé. La période active ne date que de 1889. En quelques années, on est monté à 16 millions de barils par an : chiffre maximum atteint en 1900. Après quoi, a commencé l'ordinaire décadence, qui se produit, en un si petit nombre d'années, même dans les plus beaux champs pétrolifères. En 1910, 40,6 p. 100 des nouveaux puits ont été stériles.

Les gisements sont situés dans les terrains formant la base et le flanc Ouest du bassin houiller : terrains affectés de plus nombreux, mais peu accentués. Les niveaux de pétrole se trouvent ici dans des terrains carbonifères divers (12, 13) supérieurs en moyenne à ceux de la Pennsylvanie.

Les régions les plus productives ont été les comtés de Hancock-Mannington, de Wetzel, de Marion, de Harrison, de Ritchie, de Cabell. Le groupe de Harrison est épuisé. La profondeur, à laquelle on atteint le pétrole, va de 100 à 150 m. dans le comté de Pleasants à 600-1000 m. dans le comté de Marion. En moyenne, les pétroles sont de bonne qualité et très peu sulfureux. L'exploitation est souvent gênée par

le manque d'eau, tandis que les gaz naturels se trouvent en abondance.

Enfin, dans le *Sud-Est de l'Ohio*, c'est également le carbonifère inférieur qui fournit l'huile minérale. Les terrains y ont des teneurs en pétrole très irrégulières et la proportion des puits stériles est, en conséquence, très forte (34 p. 100 en 1904 ; 39,3 p. 100 en 1908 ; 36,6 p. 100 en 1910). Une des parties les plus anciennement connues est le comté de Washington où, dès 1819, en cherchant du sel par des puits de 120 m. de profondeur, on trouvait de l'huile minérale. Le champ de Macksburg, dans ce comté, a pris une grande extension vers 1885, à la suite de sondages ayant trouvé le pétrole à 500 m. de profondeur dans le Berea grit dinantien (11). La production y fut alors de 80 000 barils par jour. En dessus de ce niveau, on en avait auparavant reconnu 7 à 8 plus élevés, désignés par leur profondeur habituelle : niveaux de 300, 500, 700 pieds, etc.

Le nombre des forages nouveaux a été de 1 344 en 1908, 2 285 en 1909, 1 685 en 1910. Leur rendement moyen est de 11 barils par jour. On s'est porté, en 1910, sur le groupe de Bremen, Junction-City et New-Straitsville, où les profondeurs moyennes sont respectivement de 750 m., 855 m. et 930 m.

Kentucky et Tennessee. — Notre figure 62 montre, après une interruption d'environ 200 km., les districts pétrolifères reprenant dans le Kentucky par un premier groupe sans valeur industrielle situé dans les comtés de Bath, Powell, etc. Après quoi, on retrouve une zone vraiment productive, à la frontière du Tennessee. Là sont les deux champs pétrolifères principaux du Kentucky, Steubenville et Coopersville, où le pétrole paraît provenir de la base du dinantien ou du sommet du dévonien (niveau de Berea ou de Venango). Ailleurs le pétrole provient des Salt Sands dinantiens (11), mais, plus souvent, d'un niveau situé sous les schistes noirs du dévonien supérieur (10). De 1908 à 1910, la proportion des puits stériles dans le Kentucky a monté de 33 à 62 p. 100.

On peut citer le champ de Bos Bar dans le Tennessee, où, après un premier forage ayant donné 13 000 barils d'huile avec une production moyenne de 20 barils par jour, tous les puits forés autour ne donnèrent absolument rien.

Territoires indiens, Oklahoma, Kansas (Mid-Continental). — Le grand massif primaire, qui occupe tout l'Est américain et dans lequel se trouvent les pétroles étudiés plus haut, se continue à l'Ouest jusque dans le Kansas, les Territoires indiens et le Texas, où il disparaît sous le crétacé. Après une interruption dans les champs pétrolifères qui correspond à un large dôme de silurien situé à l'Ouest du Mississippi, on retrouve, avec les affleurements carbonifères et dévoniens, le pétrole à peu près vers les mêmes niveaux dans ces districts de l'Ouest, qui sont, en moyenne, connus et exploités depuis moins longtemps. Les conditions tectoniques y sont seulement un peu différentes, les terrains étant fort peu plissés ; la présence locale d'un manteau crétacé amène également certains traits particuliers.

La première zone dont nous occupons ici, celle du Kansas et des territoires indiens, qui s'étend sur 400 km. de long, a surtout donné

une forte production dans le Kansas où, d'un million de barils en 1903, on est passé à 4 en 1904, 12 en 1905, 21 en 1906, 46 en 1907, 47 en 1908. Dans les territoires indiens, son développement, beaucoup plus récent, date seulement de 1904, où l'on a dépassé un million de barils. Les comtés productifs dans le Kansas sont Miami, Chautauqua, Montgomery, Neosho, Wilson, etc. En 1905, on a foré, dans cet Etat, 1518 puits, dont 197 secs, 302 donnant du gaz et 1019 donnant du pétrole. La production moyenne du premier jour par puits productif a été de 15,58 barils. Ici comme dans tant d'autres districts américains, on est arrivé au pétrole en partant du sel. On a commencé par l'exploitation du gaz d'Iola en 1873; puis on a cherché de côtés et d'autres, avec beaucoup de déboires, entre 1888 et 1902. Enfin, c'est depuis ce moment, dans une période presque contemporaine, que l'industrie s'est développée d'une façon extraordinaire. On cite, comme principaux champs, ceux d'Iola, Humboldt, Chanute, Erie, Bolton, Coffeyville, Indépendance, Cherryvale, etc. Le principal producteur est la Prairie Oil and Gaz Co, qui a fourni 31 600 000 barils en 1910.

La géologie de ce district du Kansas, qui a pris, dans ces dernières années, un si magnifique développement, est fort instructive par la manière dont elle nous présente des pétroles, dont l'âge doit être à peu près le même que celui des pétroles pennsylvaniens, dans des conditions tectoniques fort différentes.

Nous allons examiner successivement ces deux points.

Tout d'abord, la coupe comprend de haut en bas les termes suivants, parmi lesquels on remarquera que tous les niveaux gréseux, désignés comme « sables » par les sondeurs américains, sont pétrolifères.

Carbonifère supérieur	{	Calcaires et schistes divers (Pawnee, Denis, Drum, etc.). Sables et schistes de Pleasanton, contenant les « sables » de Cleveland (terr. indien), de Peru (Kansas) — <i>pétrole</i> superficiel.
Dinantien	{	Calcaires d'Oswego ou Fort Scott, avec bancs à ciment hydraulique, 8 m. Schistes et grès Cherokees (« sables » de Red Fork, de Bartlesvillen, de Glenn et de Burgess) — niveau <i>pétrolifère</i> principal, environ 130 mètres.
Dévonien	{	Calcaire du Mississipi, avec inclusions de silex; environ 160 mètres.
Silurien	{	Schistes et « sables » <i>pétrolifères</i> inférieurs de Muscogoe.

Dans cette série, les calcaires dévoniens correspondent à une période, où la mer a couvert la presque totalité des Etats-Unis. Pendant l'époque dinantienne, au contraire, on admet l'existence d'un long bras de mer, restreint dans le sens Est-Ouest qui, suivant le flanc Est des Montagnes-Rocheuses, aurait, par le Kansas et l'Illinois, rejoint les Grands Lacs. C'est sur les bords de cette mer que se seraient déposés les schistes et grès, où se sont faites ensuite les accumulations pétrolifères.

Le pétrole se trouve ici dans un certain nombre de niveaux gréseux alternant avec des schistes: dans des conditions, par conséquent, très analogues à celles de la Pennsylvanie. A la base, un étage calcaire, qui peut avoir 160 m. de puissance et qu'on nomme calcaire du Mississipi, a semblé longtemps limiter la formation pétrolifère et quelques

sondages isolés l'avaient traversé sans résultat. En 1907, on a néanmoins retrouvé au-dessous un autre niveau à 530 m. de profondeur, à Muscogoe, dans le Sud-Est du district, où affleurent ces calcaires du Mississipi : ce qui montre avec quelles réserves il faut admettre comme démonstratives les conclusions négatives tirées de quelques essais isolés, quand il s'agit de rechercher en profondeur la continuation d'une série pétrolifère connue. On peut également en conclure, avec beaucoup de probabilités, l'origine silurienne du pétrole, malgré son encaissement dans le carbonifère.

Au milieu des couches utiles elles-mêmes, les parties productives forment des lentilles sans continuité, en sorte que les résultats de sondages voisins peuvent être très inégaux. Les gaz y sont très abondants par endroits et l'exploitation est faite en partie pour les obtenir. Dans certains districts (rivière Neosho), on a observé que le pétrole était au-dessus des gaz ; mais ailleurs c'est l'inverse et l'on ne peut établir, à ce sujet, aucune loi générale.

Tectoniquement, les terrains dévoniens et carbonifères du Kansas ont une pente générale à peu près régulière vers le Nord-Ouest sans aucun plissement proprement dit. Il ne saurait y être question d'anticlinaux.

On part, au Sud-Est, des calcaires du Mississipi, pour trouver ensuite les schistes de Cherokee, le terrain de Fort-Scott et le carbonifère supérieur, sur lequel se trouvent la plupart des sondages. Sur les points les plus riches en huile ou en gaz, il n'apparaît aucun indice superficiel.

Vers les Territoires Indiens, la disposition des couches devient plus irrégulière. L'inclinaison des couches est encore vers l'Ouest ; mais elles sont affectées de plis et de failles multipliés, avec discordance entre le calcaire du Mississipi et les couches carbonifères superposées.

Nous étudierons postérieurement les pétroles du Texas et de la Louisiane, qui semblent bien être éocènes. A l'échelle ordinaire de nos cartes une certaine continuité semble s'établir entre ce district et celui des Territoires Indiens par le nouveau centre de Henrietta, trouvé en 1906 à la frontière de ces territoires avec le Texas ; mais nous ne croyons pas qu'il y ait lieu de s'attacher à ce rapprochement très relatif et sans doute purement accidentel.

Lacs Canadiens (Mackensie, Athabasca¹). — A l'Ouest de la plate-forme primitive Nord-Américaine, on retrouve le pétrole au Canada dans les territoires encore mal connus de la région des lacs. Ses conditions de dépôt seront peut-être là plus faciles à éclairer qu'ailleurs, le jour où les gise-

¹ 1875. HÉBERT (Doc.). *Sur la géologie du Mackensie* (B. S. G. F. 3, t. 3^e p. 87). — 1878. ROBERT BELL. *Report on an exploration of the east coast of Hudson-Bay*. (Geol. survey of Canada). — 1883. *Carte d'ensemble du service géologique du Canada*. — 1884. R. BELL. *Report on Part of the Basin of the Athabasca River* (Geol. Surv. of Canada, Rep. of Progress., 37 p. Carte). — 1888. *Rapports annuels* d'OBALSKI, ingénieur des mines de la province de Québec. — 1892. J. B. TYRRELL. (Geol. Map of N. W. Manitoba). — 1896-97. J. B. TYRRELL and D. B. DOWLING. *Rep. on the Country between Athabasca Lake and Churchill River* (Geol. surv. of Canada. Ann. Rep., t. 8 et 9, cartes). — Voir Année Cartographique de Schrader, 6^e sup., feuille 3. — 1900. SUSS. t. 2, 53 à 55 et bibl. — 1908. TASSART. *loc. cit.*, p. 305.

ments seront en exploitation active. Car le pétrole y apparaît, avec le sel, dans les terrains transgressifs horizontaux du dévonien, sur la bordure même de cette couronne transgressive que suit, on le sait, d'une façon remarquable, la série des grands lacs canadiens. On le trouve en allant du lac des Ours au lac des Esclaves, à l'Athabasca et au Winnipeg.

Vers l'Ouest, le cours moyen du bas Mackenzie entre déjà dans la zone des plissements reliés aux Montagnes-Rocheuses, bien que certaines parties de la rivière traversent des couches horizontales. Vers l'Est, on trouve ensuite une vaste transgression horizontale de dévonien, recouverte par des lambeaux de crétacé ou même de tertiaire, et, quand on franchit la trainée des Lacs, on voit reparaitre le soubassement archéen. Le sel et le pétrole sont abondants de tous côtés dans le dévonien, dont la série est là très complète. Les pétroles, dont l'origine est au moins dévonienne, traversent souvent le crétacé superposé, quand ils ne sont pas mécaniquement arrêtés par une épaisse couche d'argile située à la base de ce crétacé. On les trouve abondamment sur les rives occidentales du Grand Lac des Esclaves. Ils ont été surtout étudiés à l'Ouest et au Sud-Ouest du Lac Athabasca sur la Peace River et la Rivière Athabasca, toujours avec association de sel. Ainsi le Gouvernement Canadien a fait faire un sondage à Athabasca Landing (54°50; 113°40) et un autre à Pelican River pour rechercher le pétrole dans le dévonien sous les affleurements crétacés. En aval, par 56°40, avant Drowned Rapid, le pétrole apparaît également dans les berges crétacées. En amont, les deux rivières de la Peace et de l'Athabasca demeurent pétrolifères, comme l'a montré une mission officielle canadienne de 1882-1884 jusqu'à leur partie haute sur le flanc Est des Montagnes-Rocheuses et l'on rejoint ainsi, par une trainée presque continue, les suintements des Montagnes-Rocheuses proprement dites, constatés par exemple au point où le 114° degré coupe la frontière des Etats-Unis dans l'Alberta, et un peu plus au Nord, à Pine Creek, dans une région où il y a chevauchement des terrains anciens fracturés par-dessus le crétacé. Cela pourrait laisser supposer que, parmi les pétroles de l'Ouest américain intercalés dans le secondaire plissé, il peut y en avoir, conformément à une idée soutenue ici à diverses reprises, dont l'âge réel est beaucoup plus ancien que leur âge apparent.

Ouchta (Timan)¹. — Après la si importante formation pétrolifère de la Pennsylvanie, située sur le bord Est de la plate-forme canadienne, il est intéressant de retrouver en Russie, dans des conditions tectoniques tout à fait analogues, une autre formation pétrolifère, qui semble à peu près du même âge. Ces gisements, connus depuis longtemps et décrits par Keyserling, Krusenstren, Tschernyshev, ont été, en 1902, l'objet d'une petite campagne de sondages. On y est descendu à 180 m. et l'on a trouvé une série d'imprégnations pétrolifères correspondant à d'importants suintements superficiels, par lesquels l'attention avait été d'abord attirée.

Ils sont situés le long de la rivière Ouchta (affluent de l'Ichma, ou Ijma, qui se jette elle-même dans la Petchora), entre l'Ouchta et le Mézen,

¹ 1900. DESS. *Ueber die Moegl. der Erbohrung von Naphta bei Schmarden in Kurland* (Naturf. Ver. z. Riga, fasc. 43, p. 157-212). — 1902. L. DE LAUNAY. *Une nouv. rég. pétrol. à l'Est de la Mer Blanche* (La Nature, n° 1511, 10 mai). — Carte dans *Suess*, t. 3, p. 489.

sur les deux gouvernements d'Arkhangelsk et de Vologda, à environ 600 km. d'Arkhangelsk et 850 km. de Vologda. Les conditions géologiques sont les suivantes :

On a, entre la Mer Blanche et l'Oural, plusieurs plis successifs, de direction à peu près Nord-Sud, ou N.-E.-S.-W., qui s'accolent à l'Ouest contre le massif archéen de la Finlande. C'est la continuation d'un régime de plis Nord-Sud, dont l'accident principal et le plus visible est l'Oural, mais qui se prolonge en s'affaiblissant, sous des recouvrements divers, de la Mer Blanche à l'Énisséï, entre deux plates-formes primitives, dont le rapprochement a produit cette large zone plissée. Ces mouvements se sont continués très longtemps, puisqu'ils ont influencé même le permien; mais ils ont dû être

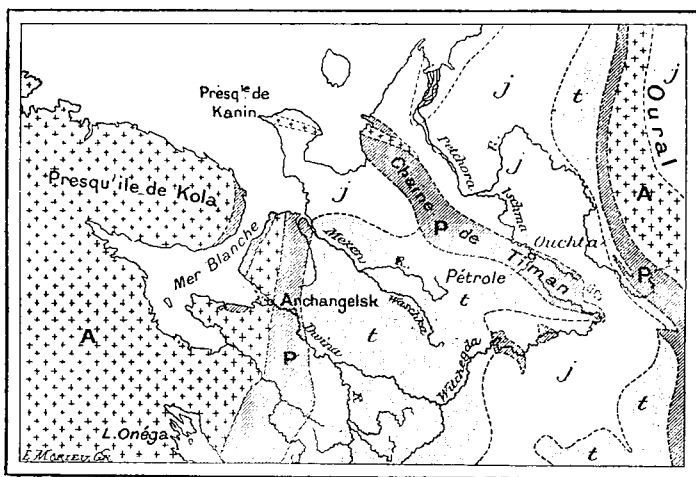


Fig. 65. — Carte de la région pétrolière de l'Ouchta.
A. Archéen et granite. — P. Paléozoïque. — t. Trias. — j. Jurassique.

amorçés, à une époque très antérieure, par une dépression, dans laquelle semblent s'être produites, à diverses reprises, des concentrations de sels lagunaires, avec accumulation locale de matières organiques. Les pétroles de l'Ouchta sont situés sur le bord Est de ce qu'on appelle la chaîne de Timan, dont le prolongement se trouve dans la presqu'île de Kanin.

Si l'on reprend l'histoire géologique de la région, on voit que, sur la plate-forme plissée à l'époque précambrienne, ont commencé par se déposer horizontalement des terrains cambriens et siluriens en ordre régulier. La limite des sédiments horizontaux et de leur substratum est aujourd'hui marquée par la ligne des lacs qui constitue ce qu'on a appelé le Glint. Puis est venue une grande transgression dévonienne, que l'on retrouve en Sibérie comme nous l'avons trouvée précédemment dans le Nord-Américain. Cette époque a dû être particulièrement favorable à ces conflits de régime marin et lacustre, en même temps qu'à ces dépôts de concentration désertique bientôt recouverts et protégés par des dépôts marins, qui caractérisent à peu près toutes les époques semblables et l'on est amené à lui rattacher les hydrocarbures, qui se trouvent aujourd'hui dans ses

strates supérieures. Le carbonifère a succédé au dévonien, puis, avec une discordance, le permien et, de nouveau en discordance, le trias et le jurassique qui ne nous intéressent pas ici.

Pratiquement, le pétrole est à l'état d'imprégnations dans une série de schistes et de grès alternants: le principal niveau occupant un grès marneux avec poches sableuses recouvert par des schistes argileux. Un niveau de schistes visible aux affleurements est si imprégné d'hydrocarbures qu'il brûle facilement avec une flamme épaisse et a reçu en conséquence le nom de Domanik, qui vient, paraît-il, de Dym (fumée). On y observe, en même temps, des suintements de pétrole. Les remaniements sont visibles ici, comme dans tous les districts pétrolifères et les accumulations de pétrole dans les grès doivent avoir un caractère adventif. Les schistes à hydrocarbures, par contre, ont plus de chances pour représenter un niveau originel, que nous avons, par suite, rattaché à la phase consécutive des mouvements calédoniens.

Asphaltes de Sysran (Volga)¹. — Les gisements hydrocarbonnés de Sysran ou des Gégouli, sur la Volga, en aval de Samara, méritent une mention par les questions géologiques qu'ils soulèvent. On est là sur une zone singulière d'accidents Est-Ouest, qui se prolongent à l'Est vers le Sud du plateau d'Oufa et qui semblent marquer le choc des plissements tertiaires contre un avant-pays caché. Les conditions ne sont donc pas sans quelque analogie tectonique avec celles que nous venons de rencontrer à sur l'Ouchta, le long du Timan. Superficiellement, ce que l'on voit à Sysran se compose de carbonifère supérieur, de permien, trias et jurassique, avec recouvrement de crétaé et de tertiaire dans l'Ouest. L'asphalte se présente, aussi nettement que possible, avec des caractères adventifs, remplissant parfois les fractures du calcaire bréchiforme permien, pénétrant ailleurs plus intimement dans la masse quand le calcaire s'est trouvé friable ou oolithique. L'âge du calcaire n'a aucun rapport avec la présence de l'asphalte. On trouve du bitume, indifféremment, dans le carbonifère, à tous les niveaux du permien et même dans les sables du callovien inférieur, qui recouvrent en discordance le carbonifère. On peut ajouter que le portlandien (aquilonien) contient quelques schistes bitumineux associés avec des grès à rognons phosphatiques, sans qu'il y ait lieu d'établir aucune relation entre ces schistes et les asphaltes. Le bitume des asphaltes venant du bas, on peut se demander, à titre de pure hypothèse, si son origine première ne serait pas dans un facies bitumineux du dévonien ou du silurien, inconnu à la surface.

Pétrole Sibérien. — Jusqu'ici, les indices du pétrole en Sibérie sont tout à fait insignifiants. Il convient cependant de mentionner ici la présence de quelques suintements pouvant avoir une relation avec la même transgression dévonienne que nous venons de rencontrer dans les pays précédents et qui a donné lieu à toute la série des dépôts salins du bassin de la Lena.

¹ 1887. A. PAVLOV. *La presqu'île de Samara et les Gégouli* (russe et fr.) (Mém. Com. Géol., 11, n° 5, 63 p.). — 1897. A. PAVLOV (Congrès géol. de St-Péters., t. 20, p. 22). — 1902. SUSS, t. 3, p. 483).

β. — PÉTROLES EN RELATION POSSIBLE AVEC LES ZONES HERCYNiennes

Observations générales. — Cas de la France. — La zone hercynienne ne comprend nulle part, au moins en apparence, de grandes venues pétrolières analogues à celles que nous venons de rencontrer dans les terrains siluro-dévonien des États-Unis et du Canada, ou surtout à celles que les chaînes tertiaires nous offriront en telle abondance de tous côtés. Mais c'est peut-être là une simple apparence. Dans bien des cas où les venues pétrolières suivent des plissements tertiaires en imprégnant des terrains très récents, nous arriverons, comme on va le voir, à la conclusion que le pétrole doit venir de beaucoup plus bas et peut-être de terrains gypso-salifères remontant à cette période allant du permien au lias inférieur qui, le long des chaînes hercyniennes, a été marquée par de si nombreuses formations de ce genre. C'est une observation analogue à celle que nous avons déjà faite précédemment à propos des Montagnes-Rocheuses Canadiennes et que nous reproduirons bientôt pour divers gisements à pétroles de l'Ouest américain, dont l'âge nous paraît être à vieillir considérablement. En dehors de ces hypothèses, il existe, le long des chaînes hercyniennes, de très importantes formations de schistes bitumineux qui, tout en ayant été décrites antérieurement, doivent être ici rappelées comme se rattachant intimement à notre sujet actuel. Enfin nous allons examiner, à titre d'exemples, quelques cas où le pétrole, soit sous forme d'huile minérale, soit à l'état d'asphalte ou de bitume, semble se rattacher à la chaîne hercynienne en France, Allemagne et Algérie.

La France, en particulier, sur laquelle nous allons nous étendre d'une façon tout à fait disproportionnée, ne présente aucun gisement de pétrole en exploitation. Ce paragraphe devrait donc être passé sous silence s'il n'y avait un intérêt majeur, pour notre pays, à coordonner les faibles indications qui peuvent diriger un jour ou l'autre dans les recherches : étant donné notamment les succès obtenus en Alsace et en Allemagne, où les conditions apparentes n'étaient pas d'abord beaucoup plus favorables que chez nous.

Les zones françaises, où il peut y avoir quelque chance de rencontrer du pétrole par sondage, se ramènent à quatre groupes, dès à présent connus pour leurs manifestations hydrocarburées diverses : les Pyrénées, l'Auvergne, le Gard et le Jura.

Sauf dans l'Auvergne, où l'âge tertiaire des hydrocarbures n'est guère contestable, nous sommes mal renseignés sur l'époque à laquelle se sont constitués ces divers groupes. Cependant, en discutant ce qu'on peut connaître à leur sujet, nous arrivons à l'idée qu'il s'est produit en France deux phases principales de dépôts hydrocarburés, susceptibles de donner du pétrole, du bitume ou de l'asphalte, phases correspondantes à celles où, pour des causes différentes, bien qu'ayant une même origine tectonique, se sont également produits : d'une part, les gisements gypso-salins ; de l'autre, les incrustations de filons métallifères. Ces deux phases sont : l'une, le permio-trias, avec prolongement local dans la période secondaire ; l'autre, le tertiaire. La relation des hydrocarbures avec les dépôts lagunaires triasiques ou permien est assez probable dans les Landes et à

Gabian dans l'Hérault; elle est également possible, bien que tout à fait hypothétique, pour le Gard et le Jura. Devant cette incertitude, nous réunissons ici la description de ces divers gisements, réservant seulement, pour être étudiés avec les asphaltes, les gisements tertiaires d'Auvergne.

Un croquis ci-joint (fig. 66) montre les progrès de la mer en France pendant la période permo-triasique, en représentant la distribution des lagunes saumâtres au début et à la fin de cette période pendant l'autunien et le néotriasique. On voit comment, à l'époque autunienne, il existait seule-

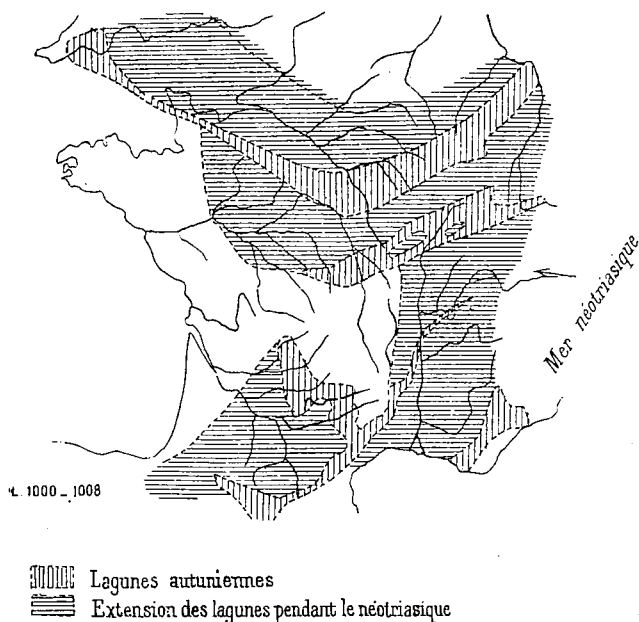


Fig. 66. — Carte des lagunes permo-triasiques en France.

ment quelques sillons de concentration saumâtre, en communication avec une mer située au loin dans le sens Sud-Est. A la fin du trias, cette mer s'est avancée jusqu'aux Alpes; et, par un mouvement de marée, les eaux saumâtres ont envahi une grande partie de la France, à l'exception de la Bretagne et du Plateau Central. Ces deux périodes sont caractérisées par des dépôts rubéfiés et bariolés à caractère continental, avec produits d'évaporation, et l'existence des hydrocarbures peut y être tout naturellement prévue: surtout, ce semble, dans la zone, également propice à la formation du gypse et du sel, où vient de se produire le dernier envahissement encore instable de la mer. Nous nous contentons de rappeler, à ce propos, la description donnée plus haut des schistes bitumineux autuniens dans l'Allier et en Saône-et-Loire. On ne connaît pas de produits semblables dans les zones à bitumes et asphaltes, dont nous allons parler maintenant: Pyrénées, Gard et Jura; mais on y trouve, de tous côtés, des gypses et sels du keuper. Il y a, en outre, le long du rivage de l'île Centrale, des niveaux de schistes bitumineux divers dans le lias, le juras-

sique (Oyonnaz), le cénomani (Vagnas dans l'Ardèche) et l'on peut hésiter entre ces diverses phases pendant lesquelles un même régime s'est reproduit, on peut même, dans certains cas, songer à une venue tertiaire pour expliquer les gisements hydrocarbonés dont le groupement, dans ce paragraphe, est, nous le répétons, tout à fait hypothétique.

Pyrénées françaises et espagnoles. — Nous considérons les Pyrénées, malgré l'âge tertiaire de leurs plissements principaux, comme nous offrant des indices hydrocarbonés en rapport probable avec une zone gypso-salifère néo-triasique. On sait combien sont fréquentes, le long de cette chaîne, les apparitions de lambeaux triasiques, de gypses et d'ophites, ramenés au jour par des accidents mécaniques, dans des conditions que nous allons également retrouver dans le Hanovre et qui se présentent aussi en Algérie. C'est très probablement en rapport avec ces formations que se sont développés quelques hydrocarbures, dont les principales manifestations connues se trouvent dans la région des Landes, à Bastennes, Gaujac, Orthez, etc.

A *Gaujac* et *Bastennes*, on a exploité du bitume avant 1850. Une recherche faite à Bastennes, en 1888, a montré le bitume arrivant par une faille de contact entre un pointement triasique et un calcaire nummulitique, au voisinage de pointements ophitiques et de sources salées provenant des argiles bariolées du trias. Quelques sondages, ayant pour but la recherche du sel, sont descendus à une soixantaine de mètres près de Dax. C'est une profondeur insuffisante pour donner un renseignement précis. On doit néanmoins remarquer que le morcellement extrême des terrains est peu favorable à la présence profonde d'un gisement développé, outre que les indices superficiels sont très faibles.

Le cas du gisement de *Gabian* (Hérault), à l'autre extrémité des Pyrénées, sur le flanc Sud-Est du massif primaire de la Montagne Noire, est beaucoup plus douteux¹. On a pu notamment y faire remarquer une proximité de basaltes, qui rappelle ce que nous observerons bientôt en Auvergne². Néanmoins ce gisement, situé dans les conglomérats rouges du permien, sur une zone permo-triasique avec ordinaires manifestations gypso-salines, a bien des chances pour se rattacher à celle-ci. Gabian (à mi-chemin entre Béziers et Bédarieux), est connu depuis le xvii^e siècle comme offrant des suintements pétrolifères, qui ont été exploités de 1608 à 1716. On y a foré deux fois sans succès, à 200 et à 400 m. de profondeur.

Ce gisement de Gabian se trouve déjà sur cette bordure Sud-Est du Plateau Central, qui, après avoir longtemps formé rivage, a été encore l'objet de dislocations, de fractures longitudinales et d'effondrements pendant le tertiaire. On peut ainsi le considérer comme la manifestation la plus méridionale dans une série de phénomènes hydrocarbonés, que nous allons maintenant étudier dans le Gard et dans l'Ardèche.

Sur le versant espagnol des Pyrénées, on retrouve de même un certain nombre de formations hydrocarbonées mal connues, dont on peut supposer l'origine analogue. C'est d'abord, en partant de l'Ouest, la région

¹ RIVIÈRE (Mém. Ac. de Montpellier, 24 mars 1707 et 2 avril 1716). — 1900. Feuille de Bédarieux au 1/80.000^e, par DEPÉRET, BERGERON, NICKLÈS.

² Voir tome I, page 544.

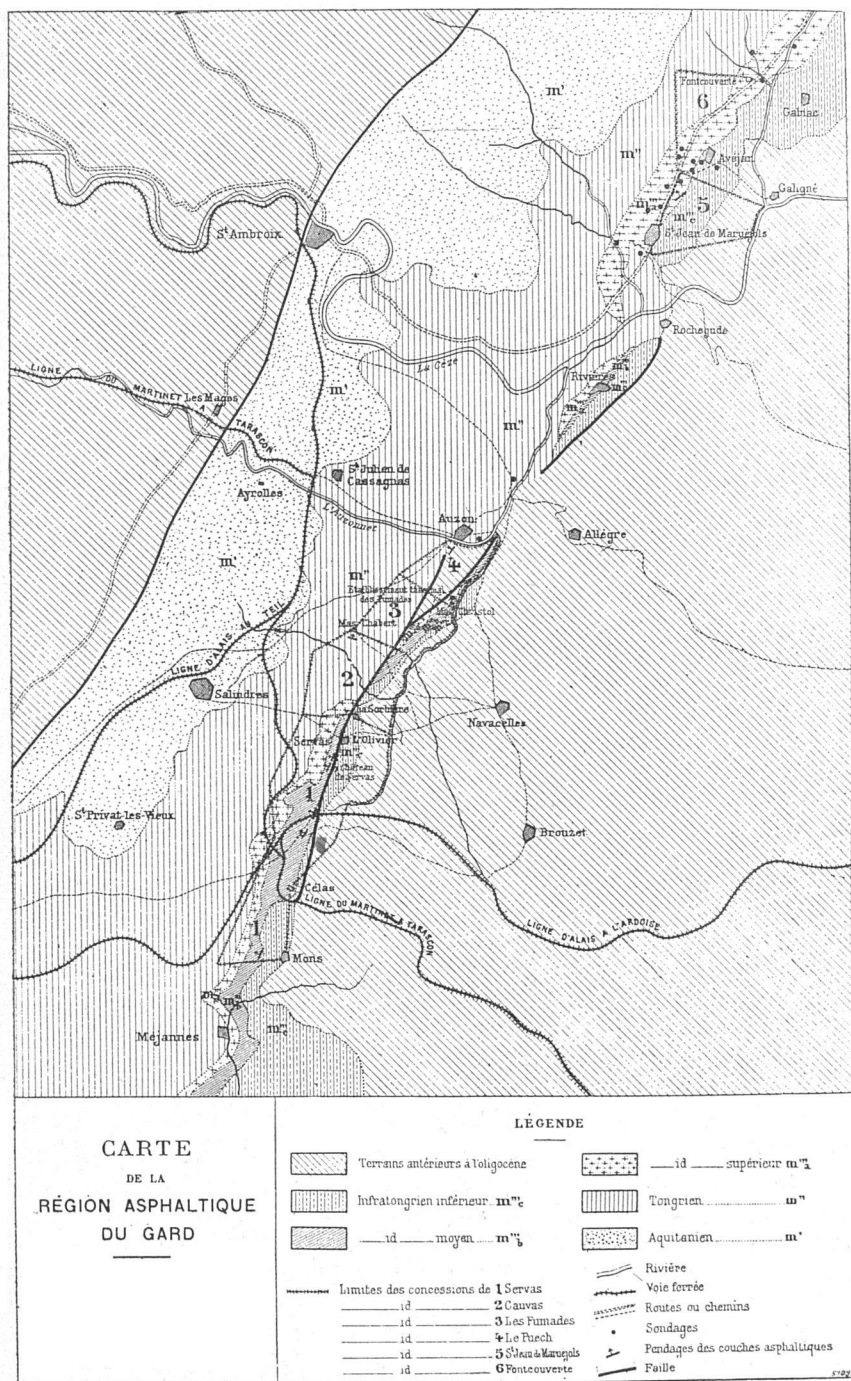


Fig. 67.

de Santander, Victoria et Pampelune, où des pointements ophitiques nombreux, représentant des réapparitions du trias gypseux, recourent le crétacé et le miocène. A l'Ouest et au Sud de *Santander*, les suintements pétrolifères sont fréquents, ainsi que sur la route de Santander à Burgos, vers *Puerto de Magdalena* et *Houdobro*, où un sondage, poussé à 500 m., a donné un peu de pétrole. On a fait de petits sondages à *Salavatierra* (25 km. Est de Vitoria) en partant de sables imprégnés de bitume.

A l'extrémité Est, on retrouve des indications du même genre, en Catalogne, près de la frontière française, autour de Ribas et dans la région de Figueras. (Pont de Molins, San Lorenzo de la Muga, etc.)

Gard. — Dans le *Gard*, il existe, à l'Est d'Alais, de Mons à Servas, aux Fumades et à Saint-Jean-de-Marvéjols, une importante formation asphaltique, que nous aurons bientôt à décrire¹. On a là, entre le massif primaire limité par failles et un autre massif crétacé situé à l'Est, un long bassin lacustre de terrains tertiaires, dont les strates diverses plongent toutes vers l'Ouest, dans le sens du massif primaire, en sorte que, de l'Est à l'Ouest, on trouve des niveaux tertiaires de plus en plus récents entre l'éocène et l'aquitainien. C'est sur la bordure Est de ce bassin, dans l'infra-tongrien, que l'on rencontre, sur une trentaine de kilomètres de long, des imprégnations asphaltiques (fig. 67).

Ces imprégnations, assez médiocres à la surface, prennent, autour de Saint-Jean-de-Marvéjols, à une profondeur atteignant 2 à 300 m. que l'on a reconnue par sondages, un développement considérable. On les trouve surtout, mais nullement toujours, à un niveau déterminé qui présente certains caractères saumâtres, avec développement latéral de lignites. Il est, dès lors, possible que l'on ait affaire à une formation d'âge oligocène. Cependant il y a tout au moins de grandes possibilités pour que l'origine des hydrocarbures soit plus profonde. Tout d'abord les bancs asphaltiques sont, tantôt des grès, tantôt des calcaires, dans lesquels cette imprégnation, malgré certains cas de calcaires striés par des bandes bitumineuses où l'on a cru voir des indices de sédimentation, nous semble très probablement adventive. En outre, quand on continue plus au Nord sur la même zone, on trouve à Vagnas, dans l'Ardèche, des schistes bitumineux cénomaniens donnant par distillation de l'huile minérale analogue au pétrole. C'est un peu l'équivalent de ce que nous allons voir plus encore au Nord, dans la vallée du Rhône. En dehors de ce cénomanien bitumineux, il faut remarquer que le trias gypseux existe, à l'Ouest de la faille, en manteau de recouvrement sur tout le plateau primaire, et doit donc se trouver en profondeur également sous la zone asphaltique.

Alpes et Jura. — A 25 km. Sud de Grenoble, sur la rive gauche de la Gresse, affluent du Drac, la *Fontaine Ardente* de Saint-Barthélémy est connue depuis l'époque romaine². Les dégagements de gaz, qui s'y produisent en assez grande abondance pour avoir amené des explosions, ont donné, en 1885, l'idée de rechercher du pétrole ; mais les difficultés du terrain ont arrêté assez rapidement. On est donc mal renseigné sur

¹ Voir plus loin, page 600, une étude sur les gisements asphaltiques.

² Feuille de Vizille, par Lory. — 1838. GRAS (Bull. Soc. Statist. Isère).

l'origine première de ces gaz. On les observe sur toute la zone plissée de schistes à posidonies calloviens, entre les calcaires noirs du lias et les calcaires à ciment oxfordiens. Le trias gypseux avec spilites, rappelant les conditions de dépôt pyrénéennes, affleure un peu à l'Est, et doit exister en profondeur.

On a fait également remarquer la présence, à 10 km. Est, des anthracites carbonifères.

Vers le Nord (figure 68), on trouve, à peu près sur le prolongement tectonique du gisement précédent, les asphaltes de la Haute-Savoie, Mussiège, Frangy, Lovagny¹, au Nord du lac d'Annecy, Chavaroche, etc. A Châtillon, dans ce département, sur la vallée de l'Ain, des dégagements de gaz combustibles ont donné lieu, vers 1855, à une petite recherche.

Plus à l'Ouest, une grande zone bitumineuse peut être suivie le long du Rhône à l'Est de Belley, puis dans la vallée de la Valserine qui en forme la suite, et se retrouve encore à l'Ouest du Lac de Neuchâtel dans la région du Val de Travers². Le terrain, qui s'est le mieux prêté aux imprégnations bitumineuses dans toute cette zone, est le calcaire barrémien à facies urgonien. Pratiquement tout se passe comme s'il y avait là un niveau sédimentaire constant. D'autre part, le kimeridgien semble, de son côté, offrir un niveau assez constant de schistes bitumineux. Il est, à la rigueur, possible que l'imprégnation bitumineuse du kimeridgien ait été contemporaine de la sédimentation; mais, dans l'urgonien, nous croyons et nous allons essayer de montrer que les hydrocarbures sont d'origine adventive, comme, dans un stade ultérieur, les imprégnations voisines de la mollasse tertiaire. Le croquis ci-joint à lui seul en donne déjà l'impression en montrant, sur une même zone, les imprégnations, tantôt dans le miocène (T), tantôt dans le crétacé (U, A), tantôt dans le jurassique (J).

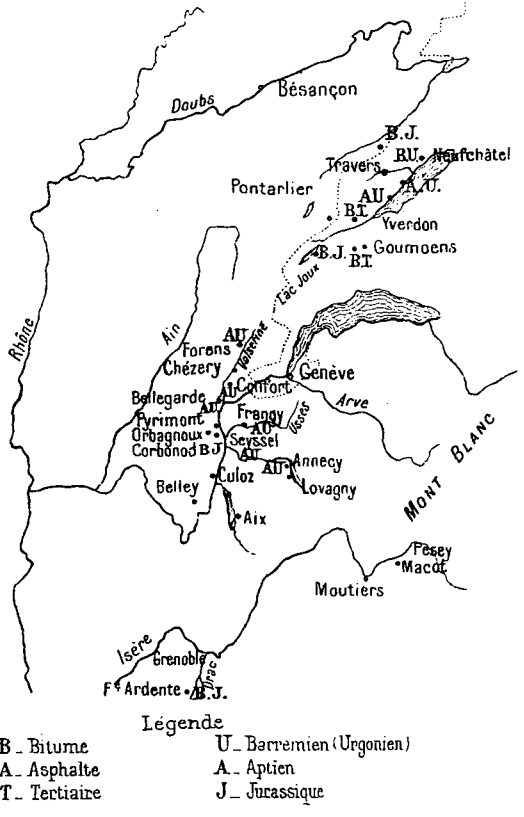


Fig. 68. — Zone hydro-carburée du Jura.

¹ Ce gisement est situé à l'Ouest d'Annecy et non au Sud, comme le montre la figure 68.
² TASSART, *loc. cit.*, p. 379. — ENGLER, *loc. cit.*, p. 136 avec carte.

En partant du Sud, on commence par trouver, dans le *Bugey*, toute une série de calcaires kimeridgiens faiblement imprégnés de bitume, dans lesquels on peut se demander si cette teneur en bitume est adventive ou contemporaine du dépôt. La localisation fréquente du bitume dans le kimeridgien, l'abondance des débris organiques dans ce terrain à Oragnoux sont pourtant en faveur de la seconde hypothèse.

D'autre part, en face Oragnoux, où les calcaires bitumineux sont kimeridgiens, se trouve Seyssel où ils sont barrémiens; et, dans les deux cas, il y a, au voisinage, du bitume imprégnant aussi les mollasses tertiaires.

D'une façon générale, l'étage kimeridgien est très développé dans le Bugey et y acquiert une grande puissance (150 à 200 m.). Il présente, à sa partie supérieure des assises de calcaires fissiles qui offrent des caractères remarquables.

Tantôt ce sont des calcaires durs à grain fin et serré, se divisant en dalles minces. Ils ont été exploités pour pierres lithographiques à Marchamp et à Ordonnaz; tantôt, au contraire, ils se divisent en feuillets très minces, affectent la texture schisteuse et se chargent de matières bitumineuses, qui ne les imprègnent pas (peut-être par manque de porosité) de manière à pouvoir donner des asphaltes, mais qui leur sont simplement mélangées. La teneur en bitume est variable: 4 p. 100 à Anglefort et sur le plateau de Châtillon de Michaille: 8 p. 100 à Oragnoux et Saint-Champ-Chatonod.

Dans ce dernier gisement, les calcaires bitumineux sont généralement rubanés de bandes allant du jaune au brun foncé. On a essayé de les exploiter pour en extraire des huiles, soit éclairantes, soit insecticides.

Puis, en remontant le Rhône, on trouve, à Anglefort, Corbonod et Oragnoux, des formations analogues, parfois accompagnées de sables bitumineux.

A *Corbonod* et *Anglefort*, il y a eu, à diverses reprises, des recherches sur des calcaires bitumineux kimeridgiens et des demandes de concession.

En face Seyssel, vient la concession de calcaires kimeridgiens et sables bitumineux d'*Oragnoux*, où l'on a fait quelques travaux, intéressants surtout par la quantité de plantes et poissons jurassiques qu'ils ont fournis, mais qu'on a dû bientôt abandonner.

Tout à côté se trouve, au voisinage de Pymont, sur les deux rives du Rhône, l'importante mine de *Seyssel*, que nous décrirons plus loin lorsque nous parlerons des asphaltes¹. Disons seulement de suite qu'on y rencontre une grande lentille d'imprégnation asphaltique dans un calcaire barrémien à facies urgonien. Toutes les indications, y compris le facies même du calcaire, sont en faveur d'une origine adventive. On rencontre cependant, plus au Nord, au Val de Travers, des asphaltes dans des calcaires du même étage, sans doute, comme nous l'avons indiqué, par une raison physique.

En même temps, on voit à Seyssel des sables verts mollassiques imprégnés de bitume. Ces sables accusent des remises en mouvement répétées des substances bitumineuses. A Bellegarde on a signalé, dans le calcaire, des fissures remplies de bitume visqueux.

Quand on dépasse Bellegarde vers le Nord et qu'on continue suivant la

¹ Page 613.

vallée de la Valserine, on voit, au-dessus du village de *Confort*, près Bogé, sur le flanc du Crédo, des sables bitumineux. Il existe, en ce point, dans un synclinal très redressé du calcaire barrémien, un lambeau de mollasse marine à l'état de sables verts plus ou moins foncés, que le bitume imprègne très régulièrement en suintant parfois à l'état liquide de certaines fissures.

En 1893, on est parti en travers-bancs de ces sables miocènes pour s'enfoncer dans la montagne. Après avoir traversé des grès verts, on a atteint le calcaire barrémien (urgonien), qu'on a trouvé asphaltique.

Puis viennent, à *Chézery* et *Forens* (deux villages voisins sur les rives de la Valserine), deux concessions d'asphalte sans grande importance, dites Forens-Seysse, qui portent encore sur des calcaires imprégnés du barrémien.

Après quoi, on peut encore considérer comme sur le prolongement de la même zone, le groupe du Val de Travers, qui sera l'objet d'une description ultérieure. On a là : aux *Epoisats* près Vallorbes, une sorte de filon bitumineux dans le bajocien ; à *Noraigue*, du bitume en filons croiseurs dans le bathonien ; à *Saint-Aubin*, du calcaire aptien bitumineux ; enfin, au *Val de Travers*, du calcaire barrémien encaissé dans un synclinal du jurassique avec de l'aptien et de l'albien. Le calcaire barrémien, à 7-10 p. 100 de bitume, constitue le gisement industriel. En outre, la mollasse tertiaire au voisinage est assez fréquemment bitumineuse.

Tous ces faits nous paraissent en faveur d'une origine adventive, qui aurait imprégné des calcaires d'âges divers en donnant des produits plus ou moins utilisables suivant leur porosité, leur teneur en argile, etc. : d'où une localisation plus fréquente à certains niveaux.

Quelle est l'origine de ces hydrocarbures, dans une région aussi bouleversée, il est difficile de l'affirmer et l'on pourrait même, par comparaison avec l'Alsace, penser, sans grande vraisemblance, au sannoisien¹ ; cependant il semble bien difficile de ne pas reculer plutôt avant le créacé, dans lequel les imprégnations sont si abondantes et nous ne saurions oublier la présence, vers le N.-E., d'une importante formation gypsosaline triasique, retrouvée en profondeur par de nombreux sondages.

Pétroles du Hanovre et du Brunswick². — Il existe, en Allemagne, dans le Hanovre, une zone pétrolifère qui offre quelque importance indus-

¹ Voir plus loin, t. 1, p. 546 à 548.

² 1874. FRIES. *Vorkommen von Petroleum in der Provinz Hannover* (Poly. Zeit., n° 22 ; Berg. und H. Z., p. 247 ; Wagners Ber., p. 977). — 1876. *Petroleum in der Lüneburger Haide* (Arch. der Pharmacie, t. 209, p. 461 ; cf. Ann. des mines, 7^e série, t. 20, p. 563). — 1876. GROTOWSKY (L.). *Der derzeitige Stand der Paraffin und Mineral Oel Gewinnung in der provinz Sachsen* (Z. f. Berg. u. H. u. Sal. Wesen, t. 24, p. 351 ; Proc. of the inst. of civil Eng., t. 49, p. 335 ; Wagners Ber., 1877, p. 1038). — 1880. VON DÜCKER. *Petroleum und Asphalt in Deutschland* (In-8°, 32 pages. Budeburg). — 1880. VON DÜCKER. *Ueber Asphalt in Westfalen* (Verh. des Naturhist. Ver., 4^e sér., t. 7, n° 2, Bonn). — 1895. HOFFMANN. *Asphalt Vorkommen von Limmer bei Hannover und von Vorwohle am Hils* (Z. f. pr. G., p. 370). — 1898. LANG. *Ueber Hannoversche Erdöl Vorkommnisse* (C. R. Z. f. pr. G., p. 172). — 1900. *Erdöl zu ElmundASSE in Braunschweig* (Z. f. pr. G., p. 163). — 1902. HÆPKE. *Die Erdölwerke in der Lüneburger Haide* (Verh. d. Ges. d. Naturf. 73^e Vers. Hamburg, p. 232-233). — 1902. SACHSE. *Erdöl in NW. Deutschland* (Allg. Oest. chem. u. techn. Ztg.).

trielle. Mais c'est surtout son intérêt géologique qui nous porte à lui consacrer une étude particulièrement détaillée. Nous avons peut-être là, en effet, un exemple de venue pétrolifère consécutive des plissements hercyniens et il peut y avoir à en tirer quelques conclusions en ce qui concerne l'avenir des recherches en France. Une raison analogue nous conduira plus tard à étudier spécialement les venues pétrolifères d'Alsace-Lorraine, probablement tertiaires, dont on peut se demander si le prolongement n'existe pas dans notre pays.

La zone pétrolifère du Hanovre (fig. 69) est souvent désignée sous le nom de zone de l'Aller. Elle suit, en effet, le cours moyen de cet affluent de la Weser avec une direction N.-W.S.-E. de Verden à Wietze, à l'embouchure de la petite rivière du même nom, où se trouve le centre d'exploitation principal, puis vers Celle, Braunschweig et Schoppenstedt. Une zone parallèle, mais plus méridionale, paraît exister au S.E. de Hanovre, vers Eggelsen. Vers le Nord, on connaît, sur des zones tout à fait indépendantes; des manifestations hydro-carburées dans le Schleswig-Holstein, à Apenrade (port du Petit Belt), et à Heide; puis dans le Hanovre à Bienebüttel au Sud de Luneburg. La direction générale de ces zones est parallèle à des directions de fractures et de plissements qui affectent les terrains secondaires au Nord et au Sud du Harz, tout à fait indépendamment des plissements primaires du Harz, prolongements eux-mêmes de ceux du Sauerland et du Westerwald. C'est, on le sait, le conflit de ces deux directions qui caractérise la tectonique de toute cette région. Sur son flanc Nord, le Harz a été découpé transversalement par des failles qui ont dû se manifester dès l'époque permienne, et l'on voit apparaître, sur ce flanc Nord de la chaîne, une série de dépôts salifères, dont les principaux sont ceux de Stassfurt, dans le Zechstein. La zone pétrolifère est au N.-W. de Stassfurt et nous ne serions pas éloignés de lui attribuer une relation avec ces gisements de sel permien. Peut-être aussi son origine est-elle dans le keuper gypso-salin du trias. Mais, dans les deux hypothèses, elle doit se rattacher à une venue hercynienne.

Wietze (20 km. W. de Celle), a pris, depuis quelques années, un réel développement. Un premier sondage avait été fait là, vers 1860, sans résultat. En 1875, un autre sondage montra, dans cette région, la présence d'une épaisse couche de sel. Puis, en 1889, on recommença à forer. En 1895, on atteignit 80 m. de profondeur: en 1899, 200 et 300 m., où furent trouvés les deux niveaux principaux. On poussa alors une fois à 600 m. sans rien obtenir. La production de *Wietze* est montée de 27 000 t. en 1900 à 40 000 en 1903, 70 000 en 1904, 54 000 en 1906, 58 000 en 1908 (46 780 d'huile lourde et 11 100 d'huile légère)¹.

Les terrains de cette région comprennent divers étages secondaires depuis le Keuper (et même, dans les sondages, le muschelkalk) jusqu'au créacé, ayant une pente très accentuée vers le N.-E. et recouverts en stratification discordante par du miocène horizontal. Les accidents mécaniques ont amené près de là, à Steinförde, l'intrusion d'un lambeau de sel permien dans le tertiaire. En connexion avec eux, des fractures nombreuses amènent le pétrole jusqu'au jour et des niveaux adventifs se

¹ Au total, la Prusse a produit, en 1909, 113 518 t. de pétrole.

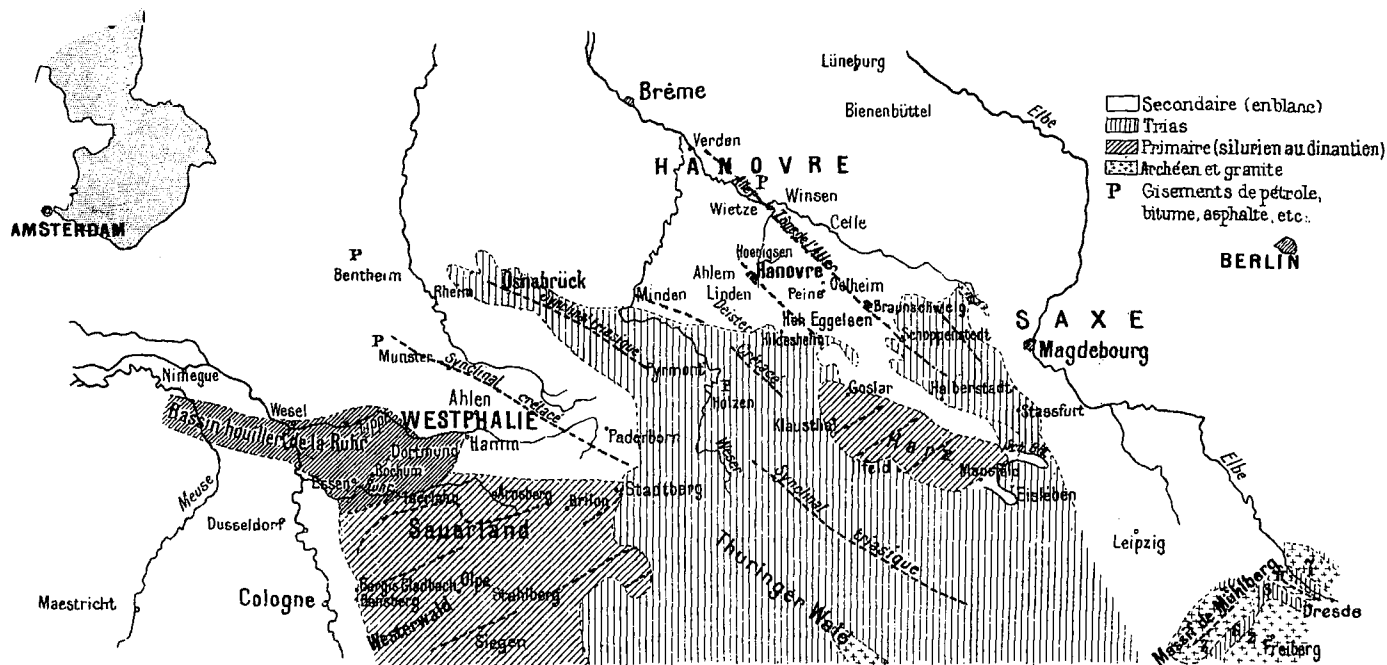


Fig. 69. — Carte des gisements pétroliers, bitumineux et asphaltiques allemands. Echelle au 1/1250 000^e.

sont constitués, à la rencontre de ces cassures, dans les diverses strates sableuses jusque dans le diluvium. L'huile vient donc du fond et l'on est en droit de songer à une relation possible avec les gites salifères intercalés, soit dans le keuper triasique, soit même, plus bas, dans le zechstein. La pression est généralement faible, en sorte qu'il faut un pompage et le pétrole contient fort peu de gaz. Comme dans la plupart des cas analogues, l'huile diminue de densité à mesure qu'on s'approfondit.

Hænigsen est au Sud de Celle et à 7,5 km. N.-E. de Burgdorf. Des suintements y existent dans le diluvium. Mais, autant qu'on peut en juger d'après quelques sondages, il doit exister, au-dessous, un horst de sel du zechstein butant contre des couches secondaires qui s'inclinent vers lui. L'exploitation n'a pas pris de développement, bien qu'on ait foré des puits donnant un moment jusqu'à 500 barils par jour.

Oelheim, à 7 km. N. de Peine, a produit 3 000 barils en 1903 et 6 000 en 1904, 1663 en 1905, 1315 en 1906. Les sondages sont placés à l'Est d'un amas de sel limité par des failles : par conséquent, dans une position analogue à celle que nous venons de trouver dans les deux gites précédents. L'amas salifère semble appartenir à une sorte de horst allongé N.-N.-W., à l'Ouest duquel les couches plongent vers l'Ouest, tandis qu'à l'Est, dans la région pétrolifère, elles ont une pente Est. Dans cette zone pétrolifère, qui semble extrêmement limitée, on trouve, du haut en bas, le crétacé, le weald, le jurassique moyen, le lias et le keuper. Les sondages pour pétrole, qui sont descendus jusqu'à 280 m., ont rencontré, en même temps, passablement de gaz et beaucoup d'eau salée.

On tire donc de là l'impression que, dans tous ces points, une zone, renfermant en profondeur des hydrocarbures associés avec du sel, probablement dans le zechstein ou le keuper, a été l'objet d'une série de cassures N.-E. donnant lieu à des tronçons surélevés de terrains salifères et probablement, avec une allure semblable, à des lambeaux de terrains pétrolifères rapprochés du jour.

Cette impression se confirme quand on passe à la seconde zone, plus méridionale, celle de *Hanovre*. A 3 km. W. de cette ville, à Ahlem, on trouve de l'asphalte dans des calcaires du jurassique supérieur. A côté de ces asphaltes, à *Linden*, on a extrait quelques barils de pétrole. *Sehnde*, plus au S.-E., a donné lieu à diverses reprises à quelques essais d'exploitation pétrolifère. On est là dans le lias sur le flanc N. d'un anticlinal, dans l'axe duquel apparaît du sel de l'âge du zechstein. Puis, vers le S.-E., à *Hoheneggelsen*, 17 km. E.-N.-E. d'Hildesheim, on a au jour quelques suintements d'huile minérale. La région, qui est plissée et faillée comme les précédentes, renferme du crétacé en contact par faille avec du jurassique inférieur et moyen. Un essai de sondage dans le crétacé n'a rien donné.

On connaît encore, dans l'Ouest de l'Allemagne, d'autres indices du même genre, que nous nous contentons de mentionner : *Bentheim*, à l'Ouest de l'Ems, près de la frontière hollandaise, avec du bitume et de l'asphalte dans le néocomien ; *Holzén* entre la Weser et l'Hilsgebirge, avec d'importantes carrières d'asphalte dans le jurassique supérieur, qui paraissent manifestement dues à une imprégnation venue d'en bas et peut-être de très bas suivant des failles, etc.

Pétroles algériens¹. — L'Afrique paraît, d'une façon générale, remarquablement pauvre en hydrocarbures. C'est tout au plus si, dans l'Ouest du continent, le long d'anciennes côtes mésozoïques, on trouve à noter quelques suintements bitumineux sur la *côte de Guinée*, dans la grande lagune d'*Assinie*, et sur la côte d'Angola, à *Mussera* et à *Dandé*. Nous nous bornons également à citer des gisements récemment signalés en Afrique australe et nous renvoyons, pour ceux de la région de Suez, au chapitre de l'Asie. Mais nous dirons quelques mots sur les pétroles algériens, malgré l'insignifiance de leur production : d'abord parce qu'ils appartiennent à un pays français ; ensuite parce qu'on peut sans doute les rapprocher

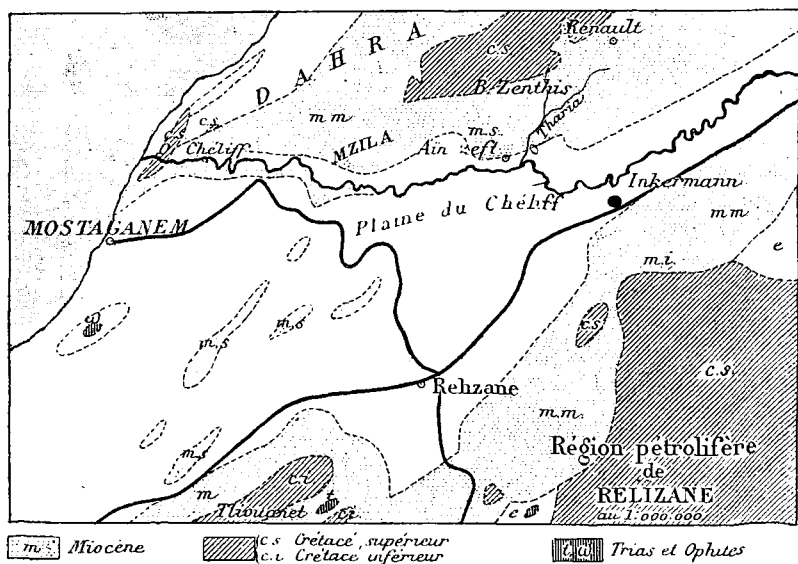


Fig. 70. — Carte des pétroles d'Algérie.

des hydrocarbures pyrénéens comme type en relation avec les gypses triasiques.

La région pétrolifère vraiment intéressante d'Algérie est celle du *Dahra* et de *Relizane*, au Nord et au Sud de la dépression du Chélif, une cinquantaine de kilomètres à l'Est de Mostaganem, où les forages ont porté sur deux points principaux : *Ain Zeft*, à 3 km. N. du Chélif dans le Dahra et *Tliouanet* ou Chabet-Msilah (Messila), 20 km. S.-W. de Relizane.

A *Ain-Zeft*, un forage de 416 m. a été placé au pied d'un îlot de gypse, dans les marnes pliocènes et a rencontré un peu de pétrole à 405 m. A *Tliouanet*, on est, en général, parti des marnes burdigaliennes (miocène inférieur), qui constituent un niveau imperméable, en pensant que, dans les grès poreux situés au-dessous, on rencontrerait une nappe pétrolifère. Le

¹ 1899. BRIVE. *Sur la géologie de la région pétrolifère des environs de Relizane* (Algérie) (B. S. G. F., t. 27, p. 128). — 1899. FABRE. *Sur un dôme triasique dans les environs de Relizane* (B. S. G. F., t. 27, p. 323 et 324). — 1901. H. NEUBURGER. *Quelques notes sur le pétrole dans le département d'Oran* (Bull. de la Réunion. d'Et. Alg.

pétrole a été, au contraire, trouvé uniquement dans les marnes. On a attribué sa présence à une faille, ou à un dôme anticlinal qui, d'une façon ou d'une autre, aurait ramené au voisinage de la surface des lambeaux triasiques, à partir desquels le pétrole se serait répandu dans les terrains, ou crétacés, ou tertiaires, en contact. Ces conditions, que nous avons déjà trouvées dans les Pyrénées et que l'on peut soupçonner également dans d'autres régions françaises, se représentent en divers autres points de l'Algérie : à *Djebel Guelb* (56 km. N. 26° W. de Tebessa), à *Fedj-Mzala* et *Ferdjouiouah* près de Milah, enfin à *Clairfontaine* (sur la ligne de Souk-Arrhas à Tébessa, etc.). Dans ces divers points, on connaît un peu de bitume dans des fissures de calcaires divers, généralement crétacés, en relation très probable avec des pointements triasiques. Il est à craindre que ces apparitions hydrocarbonées ne soient, pour la plupart, comme les îlots triasiques auxquels on peut les rattacher, restreintes et irrégulières, au moins dans la zone relativement superficielle, où les hydrocarbures n'ont été amenés que localement par des phénomènes tectoniques.

γ. — PÉTROLES EN RELATION AVEC LES ZONES DE PLISSEMENTS TERTIAIRES

1° AMÉRIQUE DU NORD

Les gisements de pétrole de beaucoup les plus nombreux, et, parmi eux, quelques-uns des plus importants, sont en relation avec les derniers mouvements orogéniques, qui ont marqué la fin des temps secondaires et le tertiaire. Nous aurons à étudier, dans ce groupe : les pétroles de l'Ouest américain, dont l'âge paraît, en général, crétacé ; puis la plupart des pétroles européens et asiatiques, situés le long de la zone plissée alp-himalayenne et de ses branchements latéraux.

Généralités sur les pétroles de l'Ouest Américain. — On trouve, sur le flanc Est des Montagnes Rocheuses, dans le Wyoming, l'Utah, le Colorado, une série de formations pétrolifères, qui semblent en relation d'origine, comme elles sont en relations de gisement, avec ce groupe si important de formations terrigènes commencé dans l'aturien (39) d'Amérique par la série de Fort Pierre et de Fox Hills, continué dans le danien (40) par les grès de Laramie et prolongé même dans l'éocène (41).

Le pétrole vient peut-être de plus bas ; mais, jusqu'à nouvel ordre, nous avons toutes raisons de rattacher sa présence à ce groupe, où les accumulations végétales se manifestent d'autre part par des lignites et charbons bitumineux.

Vers le Sud, les pétroles du Texas et de la Louisiane, par lesquels nous terminerons, semblent un peu plus récents (éocènes), sans qu'il y ait aucune impossibilité à reculer également l'époque de leur formation dans le crétacé.

Plus à l'Ouest, une zone totalement différente suit la dépression du

Paris, 27 p.). — 1903. L. DE LAUNAY. *Les Richesses minérales de l'Afrique*, p. 276 à 278. — 1907. M. LECOMTE-DENIS. *La découverte du pétrole en Algérie* (La Nature, n° 1769, 20 avril). — Une nouvelle campagne de sondage a été entreprise sur ces gisements en 1911.

Sacramento et du San Joaquin, entre les Coast Range et la Sierra Nevada en Californie. Celle-là se trouve le plus habituellement dans les terrains tertiaires néogènes ; mais, accidentellement, dans des sondages plus profonds, on a continué à trouver de l'huile dans l'éocène et le crétacé. Il semblerait donc que les formations pétrolifères ont au moins commencé pendant le crétacé, sauf à s'être peut-être continuées dans le tertiaire et nous n'avons pas de raisons pour séparer ce dernier groupe du précédent. Nous décrirons donc tous ces gisements dans l'ordre géographique, où nous venons de les énumérer.

Wyoming¹. — Il existe, au Wyoming, un peu de pétrole : au centre, dans le comté de Frémont et tout à fait dans l'angle S.-W. de l'État contre l'Utah à Evanston, Medicine Butte, etc. Cette contrée est occupée surtout par des terrains crétacés ayant des facies terrigènes, dont un type très caractéristique est fourni, un peu plus à l'Est, dans les plaines de Laramie.

Sur les États du Wyoming, de l'Utah et du Colorado s'étend une puissante formation lagunaire d'âge danien (40), dite Lignitic Groupe, ou Groupe de Laramie, qui joue un rôle important dans la production charbonneuse de l'Ouest américain. Les sédiments en sont surtout composés de schistes et de grès avec un peu de calcaires ou de marnes et l'on y trouve intercalés de nombreux lits de charbon, allant du lignite à la houille bitumineuse. Le caractère d'émergence accusé par ces couches se prépare dès l'aturien (39) par les couches dites de Fox Hills, qui contiennent déjà de la houille à 40 km. N.-W. de Laramie City et qui passent progressivement au vrai Laramie danien avec ses couches à dinosauriens cornus (Cératopsides) épaisses de 1 000 m. Des plissements bien marqués ont affecté le crétacé avant l'éocène qui le recouvre transgressivement. Après quoi, les conditions continentales et lacustres se sont perpétuées pendant l'éocène par quelques bassins plus restreints.

Il est logique de chercher un rapport entre la présence du pétrole et ces terrains bitumineux ou charbonneux lagunaires du supracrétacé.

On peut remarquer, à ce propos, que ce groupe de Laramie représente ici, à une époque plus récente, des conditions analogues à celles qui ont marqué ailleurs les dépôts du Karoo et du Gondwana : dépôts terrigènes dans un vaste bassin de sédimentation, peu profond, à fond progressivement abaissé. Ces conditions, qui ont été partout favorables aux grandes accumulations de houille, ne paraissent pas avoir été aussi propices aux dépôts bitumineux qui y apparaissent pourtant ailleurs, comme ici, à l'état accidentel.

Utah. — Dans l'Utah, il existe, sur la rive du Grand Lac Salé, de Salt Lake City à Promontory, d'assez nombreux indices hydrocarburés, qui suggèrent un rapprochement entre ce bassin d'évaporation et le bassin analogue de la Mer Morte. On s'est demandé si ces hydrocarbures ne viendraient pas de matières organiques amoncelées sur des bords marécageux, alors que le lac avait une étendue beaucoup plus grande. Il est plus probable que le phénomène est d'un âge antérieur, probablement crétacé comme dans les États voisins. Au Sud de Promontory, dans le lac même, des

¹ 1896-97. *Salt creek Oilfield (Wyoming, U. S.)* (Z. f. pr. G., 1896, p. 351 ; 1897, p. 399).

sources amènent assez de bitume pour former des ilots flottants. En faisant des sondages et en y injectant de la vapeur par le procédé qui a si bien réussi pour le soufre, en Louisiane, on en a remonté de l'asphalte liquéfié donnant un débit de plusieurs barils par jour.

Les filons de bitume (gilsonite) de Fort Duchesne (comté de Vintah), que nous décrirons plus tard¹, sont intercalés dans l'éocène.

Colorado². — Au Colorado, on a, depuis 1888, une petite exploitation pétrolifère qui se maintient vers 3 à 400 000 barils par an et qui, en 1892 et 1899, a dépassé deux fois 800 000. Le principal centre d'exploitation est celui de *Florence* (à l'Ouest de Pueblo et au Sud de Cripple Creek, où le pétrole se trouve dans un bassin synclinal de 24 km. sur 13, occupé par des terrains crétacés affectés de légers plissements. Les principaux gisements sont dans l'étage dit de Fort Pierre à la base de l'aturien (39) (sous les Fox Hills) entre 400 et 1 000 m., sans qu'il existe de niveaux bien déterminés. Le pétrole à 865°, de couleur vert foncé, se trouve dans des lentilles sableuses au milieu de schistes³.

Un autre champ pétrolifère, situé dans les mêmes terrains crétacés de Fort Pierre se trouve à 5 km. N.-E. de *Boulder* sur une bande étroite formant un pli monoclinale de direction Nord-Sud. Ici encore il remplit des lentilles sableuses, que l'on a reconnues dans les schistes jusqu'à 1 000 m. de profondeur. Sa densité est de 811.

Le long de la Grand River, à l'Ouest de Boulder, on trouve, notamment à de *Becque*, du pétrole dans les terrains daniens (40) de Laramie.

Il faut mentionner, à titre théorique, que l'on a signalé, dans ce Etat, à l'Ouest de Golden, des suintements pétrolifères sortant de l'archéen et, à Pagosa Spring, comté de Archuleta, sur le flanc Ouest des Montagnes Rocheuses, du pétrole imprégnant des dykes d'origine volcanique.

Texas et Louisiane⁴. — La région du Texas et de la Louisiane, où le pétrole, ainsi que nous allons le voir, semble d'âge éocène, a eu, comme le montrent des chiffres déjà donnés plus haut, un essor aussi rapide qu'éphémère de 1902 à 1905. Un moment, on y a vu la production atteindre à 40 millions de barils, dépassant d'un tiers tout le Bassin des Appalaches. Elle est retombée aussitôt après à 19, puis à 15 millions de barils. Cette irrégularité s'est également manifestée dans le détail par la substitution incessante d'un champ nouveau à un champ vite épuisé.

¹ Tome I, page 601.

² 1888. NEWBERRY. *The oil-fields of Colorado* (Proc. am. As. or the Adv. of Sc., Salem). — 1891. ELDRIDGE. (Amer. Inst. of min. Engin.). — 1903. *Die Boulder-Oelfelder in Colorado* (Z. f. pr. G., p. 47).

³ On trouve aussi un peu d'huile à la base du jurassique; cependant Eldridge est d'avis que l'huile doit provenir de décompositions organiques dans le niveau aturien de Fort-Pierre, parce que, si elle s'élevait de plus bas par des fissures, il devrait monter, en même temps, de l'eau venant des nappes aquifères du niveau de Dakota.

⁴ 1901. LUCAS. *The great oil well near Beaumont* (Texas) (Tr. Am. I.; Richmond meeting, 13 p.). — 1901. THIBLE. *Ueber Texas petroleum* (Chem. Ztg., n° 12-17). — 1901. PHILLIPS. *Le pétrole du Texas* (Bull. univ. du Texas, juillet; Rev. univ., t. 55, p. 367-368), — 1901. ADAMS. *Oil and gas fields of the Texas coal measures* (Bull. U. S. geol. Surv., n° 184, 64 p.). — 1902. HILL. *The Beaumont oil-field* (Texas) (Tr. Am. I. New-York, meeting, 42 p.). — 1902-03. (Z. f. pr. G., 1902, p. 139, 317; 1903, p. 87). — Voir une carte dans TASSART, *loc. cit.*, p. 204.

En 1902, *Beaumont* tenait la tête, avec 17,4 millions de barils, puis retombait en deux ans au dixième rang. En 1903, *Sour Lake* et *Saratoga* le remplaçaient et s'affaiblissaient à leur tour. En 1904, venait *Batson* avec 11 millions de barils, pour retomber à 1,1 million en 1910. En 1905, c'était le tour de *Humble* au Texas et *Jennings* en Louisiane. Humble, qui a produit, en un an 18 millions de barils, le chiffre le plus fort qu'on ait jamais atteint dans un seul champ pétrolifère, a baissé avec une rapidité semblable¹. Enfin, en 1910, *Anse La Butte*, a atteint 5,6 millions de barils. Ces grosses productions très momentanées paraissent, pour une cause quelconque, propres aux champs pétrolifères encaissés dans des terrains récents, où, d'autre part, on trouve, en même temps, fréquemment des puits jaillissants et des huiles particulièrement lourdes. Il semble que ce soit un effet de la remise en mouvement plus accentuée qui aurait amené ce pétrole plus près de la surface, dans des terrains meubles et dans des vides irréguliers, où il se serait altéré, en même temps que ses gaz acquéraient la pression nécessaire pour provoquer le jaillissement.

D'autre part, on retrouve au Texas une nouvelle application d'une règle maintes fois signalée ici et spécialement vraie pour ce genre de gites. Bien que les indications de pétrole apparaissent dispersées sur une très grande étendue, la zone riche est très localisée dans une petite bande située entre Humble et Jennings, au Nord de Galveston. Et, dans cette zone même, les énormes productions ont été fournies par quelques champs très restreints : 120 hectares à Beaumont, 160 à Sour Lake, 200 à Saratoga, 50 à Jennings. Dans ces champs, à leur tour, quelques puits ont eu, à eux seuls, des productions énormes de 2 et 3 millions de barils.

Le pétrole de Jennings qui est réputé un des meilleurs du Texas, a une densité de 890. A Saratoga, cette densité est de 930 à 965.

Les conditions géologiques sont les suivantes. On est, dans la plus grande partie du Texas, en pleine série tertiaire comprenant, si on additionne tous ses termes stratigraphiques, environ 200 m. de pléistocène, 600 m. de pliocène et 1 000 m. d'éocène. Cette série non plissée présente une pente très régulière et assez faible vers la mer. Mais ces terrains réguliers ont été recoupés par tout un système de failles, dont l'âge paraît être post-éocène : failles, dont quelques-unes sont bien visibles, et dont beaucoup d'autres doivent être masquées par la nature ébouleuse et meuble des terrains de recouvrement pliocènes. La faille la plus nette, dite de Balcones, haute de 200 m., traverse le Texas du Nord-Est au Sud-Ouest, suivie, du côté affaissé, par de fréquents pointements éruptifs de basaltes, phonolites, etc. Un système d'autres fractures doit exister parallèlement au rivage et on peut lui attribuer la réapparition, parallèlement à la côte, dans la région où sont précisément les plus riches gisements de pétrole avec les mines de soufre, d'une bande plus ancienne (éocène inférieur et crétacé). Des minerais sulfurés divers, dont nous allons parler, peuvent avoir un rapport d'origine avec ces accidents d'effondrement, qu'ont suivis des manifestations ignées, et l'on pourrait également se demander si le pétrole n'est pas associé à ces roches avec minerais connexes (question

¹ Les dépenses à amortir en si peu de temps ont souvent été considérables. A Beaumont en 1904, on avait déjà dépensé 20.000.000 de francs ; à Humble, en 1905, 30.000.000 de francs.

que nous nous sommes déjà posée pour les basaltes d'Auvergne et les serpentines de tant de pays)¹, si nous n'avions pas, d'autre part, à insister sur un rapprochement évident avec le gypse et le sel.

Les terrains relativement anciens qui forment cette zone côtière ont, contrairement à ce qui se produit pour le néogène, des pentes parfois assez fortes et pouvant atteindre 30°. Ils sont doublement importants pour nous, comme présentant les réservoirs souterrains du pétrole et comme offrant, en même temps, des masses considérables de sel et de gypse : ces dernières ayant donné, par réduction en présence des hydrocarbures, un des deux plus grands gisements de soufre natif du monde². Il suffit de lire les descriptions de ces gisements pour remarquer cette association si frappante et si habituelle du pétrole avec le gypse et le sel. Bien des caractères de ce district rappellent ce que l'on observe dans l'autre grand district solfifère du monde en Sicile, où les dégagements hydrocarbonés accompagnent également le gypse, réduit anciennement en soufre. D'autre part, quelques traits de ce bassin pétrolifère, encaissé dans des terrains récents, ont pu faire penser à Bakou. Si l'on veut entrer davantage dans le détail, les difficultés d'interprétation commencent, ainsi que cela se produit souvent dans des districts de ce genre ayant été bouleversés à la fois par la dissolution de lentilles solubles profondes et par des accidents mécaniques proprement dits. On reste notamment incertain devant des gisements salifères intercalés dans les terrains plus récents : gisements, qui peuvent représenter le prolongement des mêmes phénomènes, mais qui peuvent être dus aussi à quelques-unes de ces intrusions mécaniques ayant donné lieu, pour tant de gisements gypso-salins, à des apparences tout à fait anormales. Nous aurons également à revenir sur les minerais métallifères sulfurés. Autant que l'on peut s'en rendre compte, les conditions sont les suivantes.

Il paraît y avoir, en partant de la surface, une épaisseur variable de terrains récents, argiles, sables et graviers, qui atteint 180 m. à Dayton Hill (Liberty), 133 m. aux mines de soufre de Lake Charles (Louisiane), 40 m. à Diamonds Mound, etc. A la base de ces terrains, qui sont d'ordinaire aquifères, vient un banc caractéristique de calcaire poreux, dolomitisé, dont les parties cavernueuses se sont souvent montrées riches en pétrole, ainsi que nous l'avons déjà vu pour les calcaires du Mississipi au Kansas. Ce banc de dolomie peut avoir de 3 à 12 m. Sa richesse en magnésie paraît avoir été accentuée par des phénomènes d'altération superficielle antérieurs à son recouvrement, qui y ont déterminé parfois un mélange confus d'argiles et de parties sableuses ayant pu faire penser à des actions intrusives (Kaisers Mound). L'association de semblables calcaires dolomitisés avec des gypses et des sels est un fait que l'on observe de tous côtés (Mansfeld, Stassfurt, trias de l'Est français, etc.) et qui a pu être préparé par le dépôt des calcaires dans des eaux plus concentrées, plus chargées de sels, etc., mais qui, selon nous, tient surtout à ce que ces périodes à concentration lagunaire et désertiques, où se sont produit les gypses et sels, ont été marquées, dans de

¹ Voir tome I. pages 490, 493 et plus loin pages 589, 593, 611.

² Voir plus haut, tome 1, page 341.

tels bassins d'évaporation, par de fréquentes mises à sec, pendant lesquelles le calcaire s'est altéré: mises à sec ayant, en même temps, provoqué la rubéfaction ordinaire des argiles et grès.

Quoi qu'il en soit, nous ne sommes pas surpris de trouver, sous cette dolomie, un banc de gypse ayant parfois 100 m. d'épaisseur et pouvant être remplacé par du soufre natif. Après quoi, on entre dans le sel, que l'on a traversé: sur 150 m. à Dayton Hill (Liberty), sur 390 m. à High-Island (Chambers), etc., et dont il existe évidemment un peu partout des masses considérables. Tout ce complexe de terrains gypso-salins éocènes se lie bien, dans notre thèse, avec la présence d'argiles bitumineuses ayant donné, par une distillation ancienne, du pétrole. Dans la région des salines, on observe fréquemment ce qu'on appelle des « mounds »: soit de petits bassins déprimés pouvant avoir 100 hectares de superficie et entourés de collines ayant jusqu'à 50 m. de hauteur. Cette dénivellation peut être en rapport avec des dissolutions souterraines.

Le pétrole a été rencontré quelquefois dans la dolomie poreuse, qui lui avait offert évidemment un récipient favorable, mais plus souvent dans les parties sableuses associées aux schistes superposés. Ainsi, à *Beaumont* (Spindletop), où a eu lieu, en 1901, le premier essor de l'industrie pétrolière du Texas, on connaissait, antérieurement, des émanations de gaz naturels. Un premier puits lança un jet de 50 m. de haut et produisit, par jour 70 000 barils de pétrole lourd à 920. On l'avait rencontré dans un calcaire dolomitique avec soufre natif, vers 300 m. de profondeur et sa température était de 27°, accusant un degré géothermique très bas. Bientôt après, une exploitation intensive s'organisa avec une rapidité prodigieuse et, en 1905, on avait déjà sorti 35 millions de barils, quand la richesse décrut rapidement, en partie parce que l'eau salée avait envahi les puits et refoulait profondément l'huile minérale. Dans l'ensemble, la couche productive, épaisse d'environ 20 m., a été trouvée à 265 m. au centre du champ, à 360 m. sur les bords. L'extension de la zone productive paraît correspondre à un réservoir souterrain extrêmement limité en superficie, à peine une douzaine d'hectares, au delà duquel des puits, poussés à 750 m., n'ont rien donné.

Ailleurs, les conditions apparentes sont différentes. A *Sour Lake*, on a, dans une série de sables et argiles, dont une dernière couche d'argile très pyritisée, trouvé, jusqu'à 300 m., cinq niveaux de sables pétrolifères, dans lesquels les densités ont été en diminuant, à mesure qu'on s'approfondissait, suivant la loi ordinaire, de 960 à 920, 910, 900 et enfin 875. Des sondages de 600 m. n'ont pas donné les résultats qu'on espérait.

A *Saratoga*, on a eu également du pétrole à 950, dans des sables très fluides mêlés à des schistes fragmentés entre 300 et 450 m.

A *Humble*, devenu fameux par son énorme production de 1905, on est resté aussi dans les terrains de schistes et sables, avec de très grandes difficultés causées par les irruptions d'eau salée et par la nature bouillante des sables fluides envahissant les trous de sonde.

A *Jennings* (Louisiane), on est encore dans les sables alternant avec les schistes vers 540 m. de profondeur.

Enfin, nous avons fait allusion plus haut à des sulfures métalliques. Ceux-ci se sont présentés dans les forages où l'on a trouvé la dolomie et le

gypse. A High Island (Chambers), il y avait de la galène, de la blende et de la barytine ; à Big Hill (Jefferson) et à Belle-Isle, des cristaux de galène et de blende mêlés aux argiles associées au gypse ou au sel ; à Diamonds Mound, de la blende dans la dolomie, etc. Ce n'est pas le seul cas dans le monde où l'on ait observé un phénomène de ce genre. Ainsi à Truskawice, près de Boryslaw en Galicie, on a signalé un gisement de galène et blende avec gypse et soufre natif associé à l'ozocérite et au pétrole. Il ne faut pas, à notre avis, dans des cas semblables, se hâter de penser à une venue interne d'hydrocarbures ayant accompagné des fumerolles métallisantes. Nous serions plutôt disposés à rapprocher ce phénomène de ce qui se manifeste dans les schistes bitumineux cuprifères du Mansfeld et dans tant de gisements cinabrifères où le mercure s'accompagne d'hydrocarbures. Ces hydrocarbures paraissent avoir rempli le rôle de réducteurs précipitants sur des éléments métalliques, dont la présence dans les eaux paraît elle-même le plus souvent due à la remise en mouvement secondaire d'éléments ayant pu avoir une origine tout à fait indépendante.

Californie¹. — La Californie présente une zone pétrolifère d'une très grande importance industrielle, aujourd'hui la première du monde par son chiffre d'extraction. On y a extrait, en 1910, 10 MT, soit le tiers de toute la production des Etats-Unis et 23 p. 100 de la production mondiale. Cette zone a été reconnue sur 500 km. de long, de Point Arena au Nord de San Francisco jusqu'à Los Angeles au Sud, dans cette dépression elliptique située entre le Coast Range et la Sierra Nevada, où coulent en sens inverse, pour aller converger vers la baie de San Francisco, le Sacramento et le San Joaquin. La production, qui était à peine de 300 000 barils en 1890, a monté brusquement à 25 millions en 1905 et 78 millions en 1910, amenant à ce moment une crise de surproduction. A la surface, de nombreux suintements bitumineux et asphaltiques avaient très anciennement attiré l'attention ; mais de nombreux succès les avaient fait abandonner presque complètement, jusqu'en 1892 où on les a repris. Le pétrole obtenu est de très forte densité et surtout utilisé pour le chauffage. Nous avons déjà vu que, pour les chemins de fer et les industries, il tend à refouler les combustibles minéraux sur toute la côte Pacifique. Les travaux du canal de Panama en absorbent de fortes proportions et l'on s'attend à ce que l'ouverture prochaine de ce canal en 1913 donne à cette industrie un essor nouveau.

Sur 5 MT produites en 1905 (35 671 000 barils), il en est venu 1,96 de Kern River, 1,24 de Coalinga, 0,74 de Santa Maria et Lompoc, 0,41 de Los Angeles, 0,24 de Fullerton et Brea-Canyon. Sur 10 MT en 1910 (77 475 000 barils), on en compte 2,39 de Coalinga, 1,90 de Kern River,

¹ 1867. SILLIMAN. *On naphtha and illuminating oil from heavy Californian petr.* (Am. J. of Sc. (2), t. 43, p. 242 ; London chem. News, t. 17, p. 257 ; San-Francisco Bull., 3 avril 1867 ; B. S. C. P., 1868, p. 77). — 1876. GIBBS. *Californian petroleum* (San-Francisco min. a. sc. press, t. 33, p. 368). — 1899. WATTS. *Petroleum in California* (Am. Inst. of min. California meeting, 7 p.). — 1901. WATTS. *Oil and gas yielding formations of California*. — 1901. *Das Kern River Oelfeld in Californien* (Z. f. pr. G., p. 117). — 1901. CLAYPOLE. *Notes on petroleum in California* (Amer. geol., t. 27, p. 150-159).

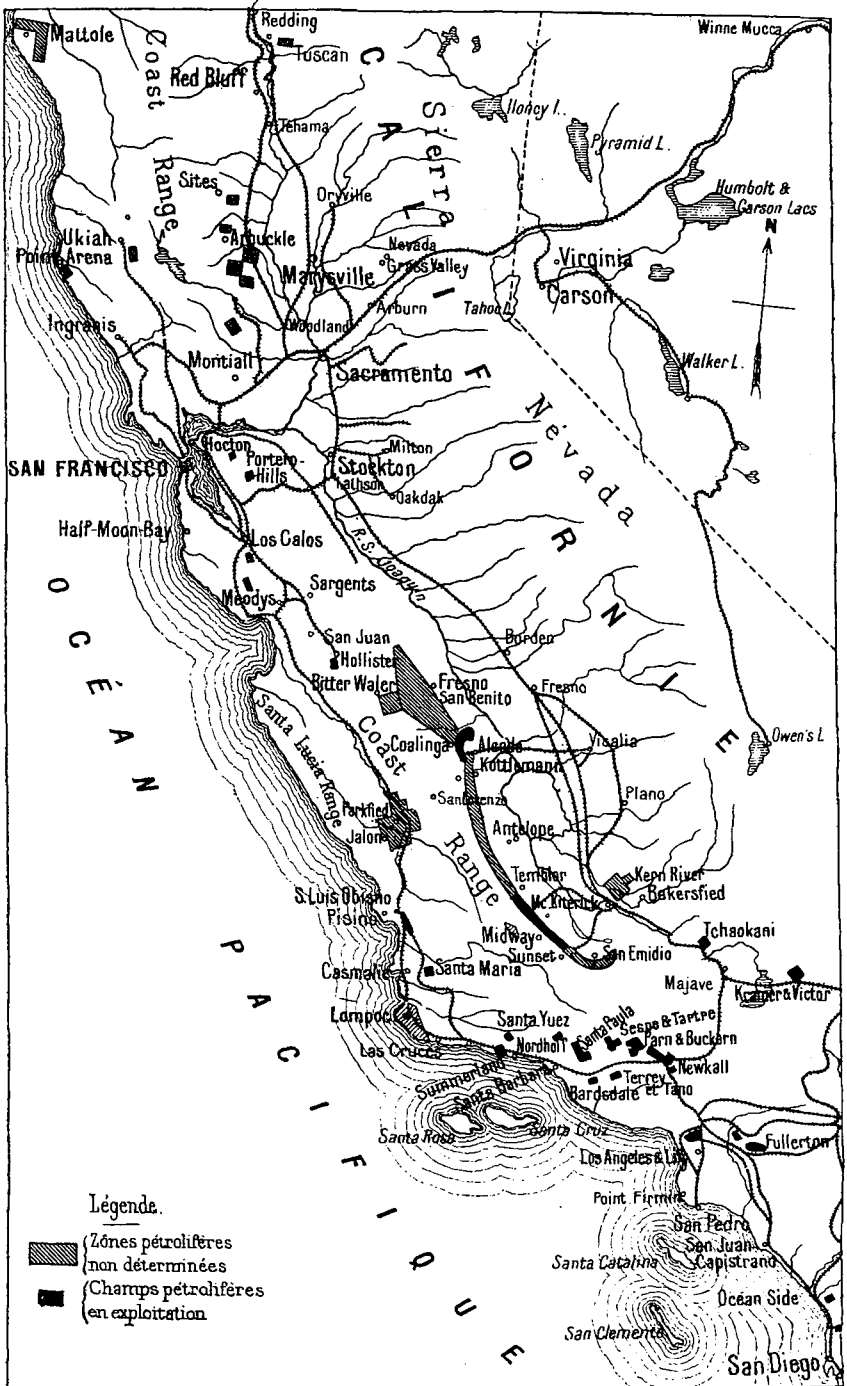


Fig. 71. — Carte générale des gisements pétroliers de Californie.

1,43 du nouveau district de Midway (Lake View)¹, 1,17 de Sunset, 0,98 de Santa Maria et Lompoc. Le nombre des puits productifs a passé de 2 116 en 1905 à 4 692 en 1910 : ce qui fait ressortir aujourd'hui la production annuelle moyenne d'un puits à un peu plus de 2 000 t.

Géologiquement, on peut dire, en deux mots, que la Sierra Nevada est formée de granites avec des bandes minces de terrains divers allant du dévonien au crétacé sur son flanc Ouest. Le Coast Range présente des terrains crétacés et néogènes avec des roches ignées. Dans la zone pétrolière, les puits partent du tertiaire et trouvent d'ordinaire le pétrole dans le pliocène ou le miocène. Quelques-uns atteignent le crétacé à Oil City et à Colusa, ou au moins l'éocène dans le comté de Ventura (fig. 71).

En partant du Nord, la vallée du Sacramento renferme, dans les comtés de Colusa, Glenn, Sutter, etc., d'assez nombreux indices hydrocarburés, associés à des eaux salées et parfois à des serpentines, sans qu'il y ait eu nulle part mise en exploitation. Dans la vallée du San Joaquin, au contraire, on a, dès Stockton, des puits à gaz utilisés ; puis une première exploitation de pétrole à Coalinga, des asphaltes entre Asphalto et Tar Canon sur 150 km. de long, parfois avec suintements d'huile lourde ; une zone exploitée secondaire à Temblor et Mac Kittrick (Ouest de San Joaquin) ; enfin un grand centre actif dans le comté de Kern River (au Nord de Bakersfield), à l'Est de la même rivière.

Un même enrichissement du Nord au Sud se manifeste également (du moins si l'on se borne à la situation industrielle qui peut tenir à des causes très complexes) quand on suit la côte. Au Nord, les pétroles de Mattole, rencontrés à 350 m., sont à peu près inutilisés. Au Sud, au contraire, ceux de la rivière Santa Clara dans le comté de Ventura (Santa Paula, etc.) et de Los Angelés ont une importance réelle.

A *Coalinga*, le pétrole provient de deux zones distinctes. Dans le district d'Oil City, le premier de ce groupe qui ait été exploité, on a, sous les grès tendres pliocènes, des sables et grès miocènes avec couches gypseuses intercalées et, à la base, des schistes poreux et siliceux produisant une huile lourde à 960 ; puis des schistes sableux crétacés où l'on trouve l'huile légère à 860 : le tout ayant un plongement rapide vers le Sud-Est. Ailleurs, les terrains néogènes, qui suivent le pied des collines avec un faible plongement, renferment des niveaux de pétrole de plus en plus riches à mesure que l'on s'enfonce. Vers 4 à 500 m., on a eu des puits jaillissants donnant jusqu'à 1 500 barils de pétrole par jour. Les nappes aquifères sont souvent une gêne. Il arrive ainsi qu'un puits ne donne à peu près rien jusqu'au moment où on épuise l'eau dans le sondage ; il se produit alors un jaillissement ; en sorte que l'habitude est de forer très profondément et de perforer les tubes sur toute la hauteur des terrains pouvant contenir du pétrole. Coalinga a atteint, en 1906, 1 275 000 t.

Le comté de *Kern* produit à lui seul presque la moitié du pétrole californien. Parmi ses districts productifs, celui de Mac Kittrick et Temblor a commencé par l'exploitation de bancs d'asphalte et de sables bitumineux donnant un pétrole à 990. Le champ, qui s'est développé depuis 1900,

¹ Ce district se trouve entre Mac Kittrick et Sunset, au Sud de la vallée du San Joaquin, sur environ 10 km. de long.

porte sur du néogène moyen très incliné, contenant des schistes avec terrains salifères. Dans le district de Sunset, l'attention a été attirée, en 1877, par les asphaltes et sables bitumineux. Après beaucoup de déboires tenant notamment à des venues d'eau, on a fini par trouver, entre 250 et

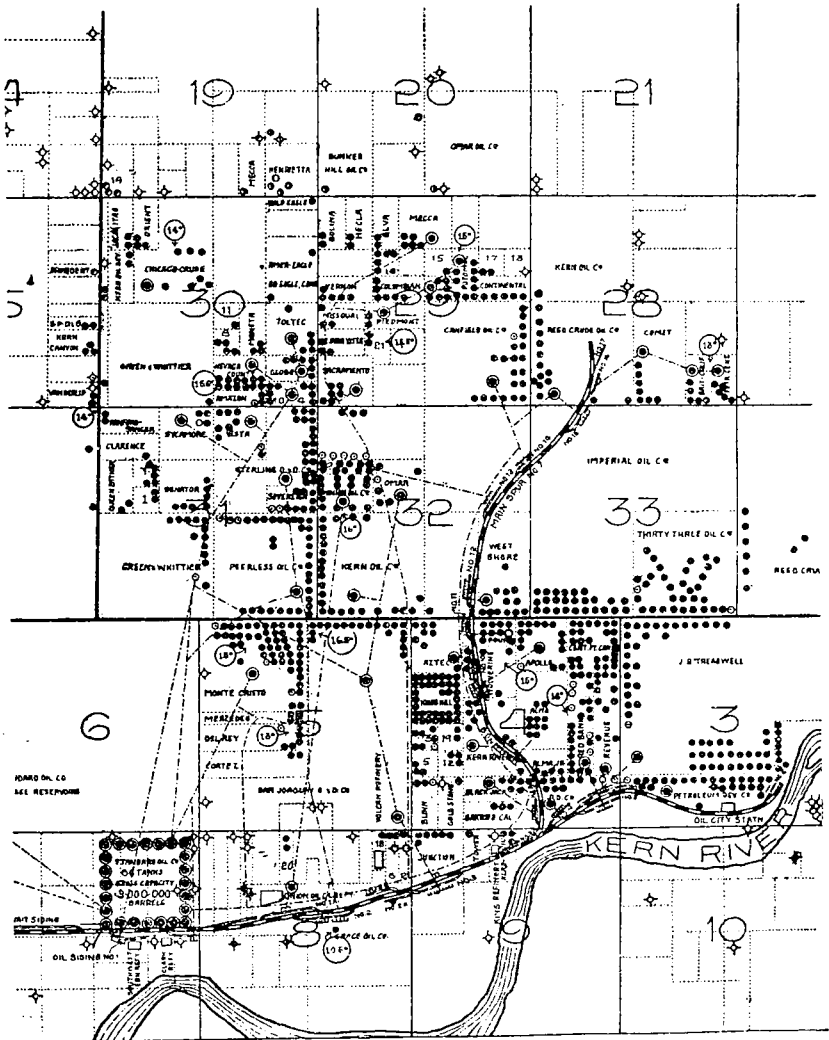


Fig. 72. — Plan des sondages pétroliers du district de Kern-River (Californie), d'après Tassart.

300 m., de bons niveaux de sables pétroliers alternant avec des argiles dans le néogène plissé. L'huile très lourde, à 950-995, ne peut être utilisée que comme combustible.

Enfin, toujours dans le comté de Kern, le district de Kern River a atteint 2 500 000 t. en 1904 pour retomber à 1 650 000 t. en 1906.

Nous reproduisons, d'après Tassart (fig. 72), le plan des sondes de ce district comme exemple d'exploitation intensive. L'huile, de densité 950-995, doit être pompée ; mais le gisement est d'une régularité remarquable, surtout pour un gisement encaissé dans le tertiaire. Les sables productifs, qui ont une épaisseur de 100 m., se rencontrent à une profondeur allant de 180 m. à l'Est à 360 m. au centre. Ils sont intercalés au milieu d'argiles.

Dans le comté de *Ventura*, les exploitations sont développées le long de la Santa Clara River : surtout au Sud, près de la Santa Paula. Les couches sont très bouleversées, aussi bien par des failles que par des plissements et l'on n'a pas encore trouvé de centre véritablement important par lui-même ; mais chaque puits individuellement est, en moyenne, assez stable et durable. Les terrains, qui vont de l'éocène au pliocène, sont pétrolifères dans leurs divers bancs sableux, séparés les uns des autres par des schistes argileux ou siliceux avec quelques conglomérats.

Sur la zone pétrolifère, on trouve, à 5 km. de Fimore, une véritable solfatare. Ailleurs les dépôts de bitume et d'asphalte sont extrêmement abondants. L'huile même va de 825 à 972, en sorte qu'une partie peut être utilisée au raffinage, contrairement à ce qui se produit pour la plupart des huiles californiennes, bonnes seulement comme combustibles. Certains sondages sembleraient indiquer des suintements pétrolifères dans des granites fissurés amenés anormalement au-dessus du tertiaire.

Enfin, à *Los Angeles*, on a eu récemment ce fait curieux d'une exploitation pétrolifère se développant au centre d'une ville moderne et arrivant un moment, en 1905, à produire 410 000 t., pour retomber, il est vrai, l'année suivante, à 238 000 t. Les terrains, qui présentent les caractères ordinaires des gisements californiens, sont des grès alternant avec des schistes et des conglomérats dans le néogène très plissé (parfois jusqu'au renversement).

2° MER DES CARAIBES, MEXIQUE ET AMÉRIQUE DU SUD

Une très importante trainée de produits bitumineux part de la côte Mexicaine au Nord de Vera-Cruz, suit la chaîne incurvée des grandes Antilles par Cuba, Haïti, etc., atteint les Barbades, se retourne en contournant la mer des Antilles par la Trinidad et la côte Vénézuélienne, arrive au lac de Maracaïbo et va se rattacher à la chaîne des Andes. Sur toute cette longueur, les pétroles, qui doivent exister en profondeur et que l'on y a en effet retrouvés de divers côtés, se décèlent superficiellement par des bitumes, qui ont constitué, jusqu'ici, le principal produit industriellement exploitable. Nous aurons donc à revenir sur quelques-uns de ces gisements en parlant du bitume. Mais nous en donnons, dès à présent, la disposition générale.

On sait comment la chaîne des Antilles comprend trois arcs concentriques : l'un extérieur formé de terrains miocènes ou pliocènes horizontaux qui relie le Yucatan, la Floride et les Bahama ; puis la cordillère plissée des Grandes Antilles, qui est ici la zone intéressante pour nous ; et, à l'intérieur, un arc volcanique en activité. Tout ce système peut être considéré

comme ayant été comprimé entre les deux masses primitives des États-Unis et du Brésil.

La chaîne plissée est surtout formée de crétacé et de tertiaire, avec terrains à facies flysch, roches serpentinesuses et traînée pétrolifère connexe.

Mexique¹. — Si nous partons du Nord, au Mexique on trouve le pétrole avec bitume connexe sur la côte du golfe du Mexique, au Nord de la Vera Cruz dans le district de Tampico, sur la lagune de Tamiahua et à Tuxpam.

Les succès obtenus plus au Nord dans le Texas ont attiré de ce côté, dans ces dernières années, une importante campagne de recherches. Près de Tampico, à Ebano, il existe une exploitation industrielle de pétrole et l'on obtient, comme résidu, du bitume, dont la production, rapidement croissante, atteint 10 à 12 000 t. Les sondages, descendus à 680 m., donnent du pétrole très lourd, de densité 1012.

A Tuxpam, on a des filons de bitume, qui passent pour être d'une qualité supérieure (jusqu'à 270 fr. la tonne).

Cuba². — A Cuba, une traînée pétrolifère avec asphalte connexe suit toute la longueur de l'île de la Havane à Holguin.

Un grand nombre d'exploitations, commencées autrefois, ont été abandonnées depuis la guerre hispano-américaine.

Au voisinage de la Havane et de Guanabacoa on a fait remarquer le rapprochement du bitume avec les serpentines. C'est un fait que nous retrouverons dans les îles de la Sonde et qui doit être comparé avec l'association des ophites, du gypse et du bitume, signalée plus haut dans la zone pyrénéenne³.

A Guanabacoa, d'après Davies, le bitume suinterait de la serpentine. Taylor parle de veines bitumineuses cunéiformes dans une série de roches métamorphiques et magnésiennes, parmi lesquelles dominent la serpentine, les diorites et les euphotides.

Néanmoins les hydrocarbures se trouvent surtout dans les sédiments plissés, grès et marnes, qui accompagnent ces roches.

On retrouve des gisements analogues dans les provinces de Santa-Clara (Yaguajay) et de Santiago de Cuba.

Haïti⁴. — La République de Saint-Domingue, qui forme l'Est d'Haïti,

¹ 1911. H.-L. WOOD (Oil and Gaz Journal, 6 avril). — 1872. TORREY. *Mexican petroleum* (Am. Chem., t. 2, p. 290; cf. Crew, p. 68). — 1911. VILLARELLO. *Zonas probables de acumul. de petroleo*, etc. (Bol. Soc. geol. mexic., t. 7, p. 23 à 31).

² 1864. CHATEAU. *Bitumes de Cuba* (Ann. génie civil, févr.). — 1878. RODRIGUEZ (B.). *L'asphalte de Banos* (île de Cuba). (Rev. un. des Min. (2), t. 4, p. 756). — 1880. P. SALTERAIN. *Apuntes para una Descripcion fisico-geologica de las Jurisdicciones de la Habana y Guanabacoa* (Bol. Com. mapa geol. de Esp., t. 7, p. 161-225, carte). — 1897. SUESS, t. I, p. 729, avec bibl.). — 1902. VAUGHAN. (Eng., p. 344-347; Z. f. pr. G., p. 235).

³ Voir plus haut, tome 1, page 534, note 1, une liste de gisements hydrocarbures, associés de même à des serpentines, ophites ou basaltes,

⁴ 1871. MARVINE. *Santo Domingo petroleum* (Rep. com. of Inq. to Santo-Domingo, p. 109-110). — 1872. GABB. *On the occur. of petr. in the island of Santo-Domingo* (Am. J. of Sc. (3), t. 3, p. 481). — 1872. WALLER. *Notes on the petroleum of Azua* (San-Domingo) (Am. Chem., t. 2, p. 220). — 1873. W. M. GABB. *On the topog. and geol. of Santo-Domingo* (Tr. Am. Phil. Soc. Philadelph., t. 15, p. 45-259, cartes).

contient, comme Cuba, mêmes schistes, grès et calcaires à facies flysch allant du crétacé à l'éocène, avec intercalations serpentineuses et gites de pétrole.

Barbades¹. — Aux Barbades, le bitume (Manjak) forme des veines filoniennes dans les terrains tertiaires du district de Scotland. L'une d'elles l'a montré, à 50 m. de profondeur, passant à une huile lourde. Son origine pétrolière n'est donc pas douteuse. Le bitume, plus pur que celui de la Trinidad, est employé pour la fabrication des vernis noirs et vaut 400 à 500 fr. la tonne sur le marché anglais. On le préfère à la gilsonite de l'Utah comme ne nécessitant pas l'addition d'une substance noire. On extrait, en outre, à College Siding, quelques tonnes d'un pétrole épais et visqueux.

La Trinidad². — L'île anglaise de la Trinidad est connue depuis longtemps pour ses grands gisements bitumineux du lac de la Braye, qui seront un peu plus loin l'objet d'une description spéciale³. Les suintements hydrocarburés sont un fait très fréquent dans le reste de l'île. Ils ont donné lieu récemment à des sondages pour pétrole, à la suite desquels a été commencée une exploitation, qui, très probablement, doit être appelée à se développer.

La figure 73 montre assez la disposition générale des terrains de la Trinidad, tous plissés dans le sens Est-Ouest, parallèlement aux deux côtes Nord et Sud. On y voit, au Nord, par conséquent à l'intérieur de la courbe des Antilles, un massif à aspect archéen correspondant peut-être à celui qui existe au Sud de Cuba et sur l'âge réel duquel on a discuté.

Contre ce massif s'appliquent, au Sud, des terrains néocomiens, miocènes et pliocènes plissés. On trouve, jusque dans le néocomien de la zone centrale, mais surtout dans le miocène supérieur, des suintements bitumineux et des sources avec huile minérale montrant que l'origine des hydrocarbures doit être cherchée logiquement au-dessous de ces terrains, sans qu'aucun niveau affleurant au jour donne la clef du problème. Ajoutons, pour être complet, que la série miocène de Caroni, épaisse de 1200 m., contient des lignites. Un assez grand nombre de sondages, poussés dans ces dernières années jusqu'à 400 m. de profondeur, dans la région de Mayaro, au Sud-Est de l'île, ont montré la grande extension des niveaux de sables pétrolières. Ce sont évidemment des suintements empruntés à ces réserves profondes qui donnent le bitume du « Pitch Lake ». Il est à remarquer que tous ces hydrocarbures sont fortement sulfurés.

Vénézuéla. — La formation pétrolière de la Trinidad se prolonge très

¹ 1891-92. A. J. JUKES-BROWNE and J. B. HARRISON. *The geology of Barbados* (Quart. Journ. geol. Soc., t. 47, p. 197-252; t. 48, p. 170-225. — Geol. map. of Barbados). — 1899. DU BOIS. *Die Bitumen von Barbados* (Z. f. pr. G., p. 397).

² 1841. SAINTE-CLAIRE DEVILLE. *Bitume de la Trinité* (C. R., 26 juin). — 1860. WALL et SAWKINS. *Rapport sur la géologie de la Trinité*. — 1868, GORDON. *Trinidad Petroleum* (J. Sc. A., t. 16, p. 763). — 1878. W.-O. CROSBY. *Physical geography and geology of the Island of Trinidad* (Proc. Soc. of nat. hist., t. 20, p. 44. Boston). — 1882. CUMENGE. *Le bitume de la Trinité* (Ann. des M., p. 137). — 1907. R. W. ELLS. *Geology of Trinidad* (Roy. Soc. of Canada, mai).

³ Tome 1. page 601.

nettement sur le continent, le long de la presqu'île de Paria, depuis le golfe de Paria jusqu'au golfe de Cariaco (Punta de Aroya). C'est le groupe de la province de *Bermudez*, qui a produit 32 000 t. de bitume en 1907 et 35 000 t. en 1908.

Plus loin vers l'Ouest, en se rapprochant de la frontière colombienne, on trouve encore du bitume au lac de *Maracaibo*, où il s'est développé, dans

1 4 1

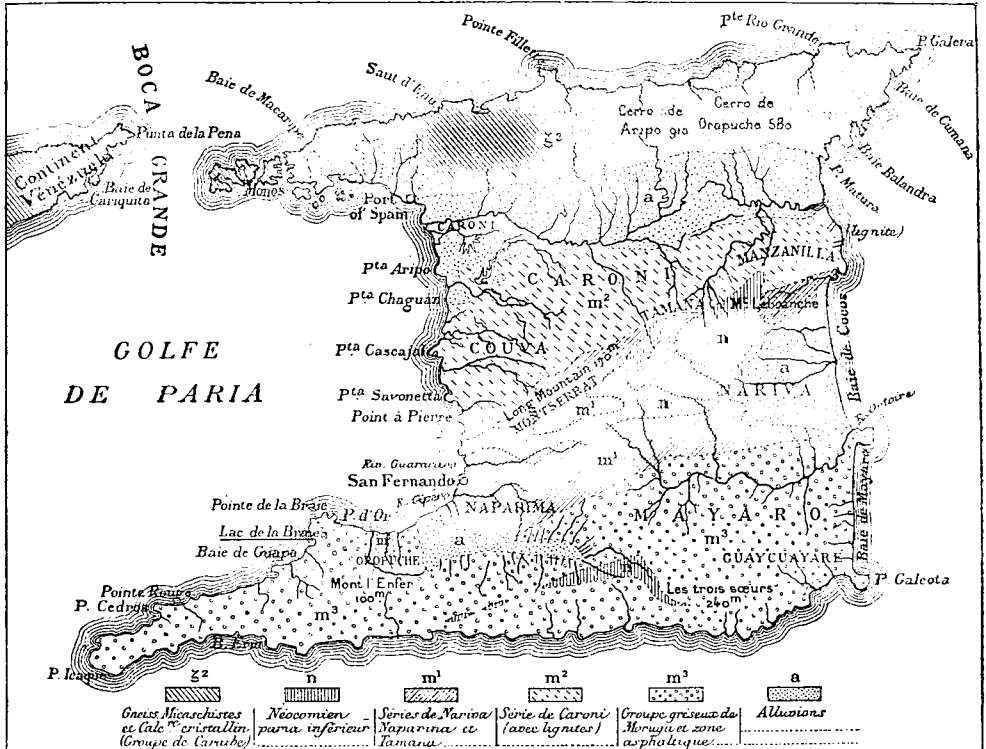


Fig. 73. — Carte géologique de l'île de la Trinidad.

ces dernières années, par l'action de sources thermales, un dépôt de bitume superficiel couvrant 20 hectares. On y a commencé des sondages en 1910.

Colombie. — La trainée pétrolifère du Vénézuéla se poursuit encore en Colombie, à la baie Rios Arboletes et à Tulera, où les sources de pétrole sont abondantes, mais inutilisées.

Equateur et Pérou¹. — Le long de la chaîne des Andes, on aurait pu s'attendre à trouver un alignement pétrolifère, dont la présence serait naturelle en toute hypothèse, mais aurait été particulièrement indiquée

¹ 1873. *Peruvian petroleum* (J. Soc. of Arts, t. 21, p. 234). — 1877. G. UZIELLI. *Nuovi sorgenti di petrolio nell' America meridionale* (Boll. d. R. Com. geol. d'Italia, t. 8, p. 150). — 1900. *Pétrole au Brésil* (Z. f. pr. G., p. 392). — 1907. F. MASTERS. *Informe prel. sobre la zona petrol. del Norte del Peru* (Bol. cuerp. Ing. Minas Peru, 50).

dans la théorie volcanique. En réalité, ce qu'on connaît de pétrole dans l'Amérique du Sud se borne à fort peu de chose : une zone comprise entre 2° et 6° Sud, qui va de *Santa-Elena*, dans la République de l'Équateur à la *Poinle de Aguja* dans le Pérou, sur les deux rives du golfe de *Guayaquil*. Les suintements pétrolifères imprègnent des sables tertiaires et l'on trouve, au voisinage, des sources salées contenant, notamment près de Santa-Elena, à Volcaniceto, des chlorures, bromures et iodures. La seule région où les exploitations aient pris quelque développement est celle de *Zorritos* au Pérou, où il y avait, en 1893, 40 puits donnant en tout 100 barils par jour au moyen de pompe.

Argentine et Chili. — Nous nous contenterons de mentionner, en outre, sur le flanc Est des Andes, dans la province de *Mendoza*, quelques suintements de pétrole en rapport avec le rhétien, qui ont été vite épuisés. En 1910, on a également signalé des pétroles près de *Punta Arenas* et à *Agua Fresca*.

3° AUVERGNE ET ALSACE

Nous allons suivre les chaînes de plissements tertiaires à travers l'Europe et l'Asie. Ce qui nous amène à commencer par les très faibles indications de ce genre constatées en France¹. Après quoi, nous passerons à l'Alsace, à la Galicie, à la Roumanie, à l'Italie, au Caucase, au Turkestan Russe, à la Birmanie, aux îles de la Sonde et au Japon.

Auvergne. — En Auvergne, quelques gisements d'asphalte ont d'autant plus attiré l'attention que la proximité des massifs volcaniques semblait, pour beaucoup de géologues, partisans de l'origine éruptive du pétrole, un indice favorable. Nous aurons à décrire les très nombreux suintements bitumineux de la région de Pont du Château à l'Est de Clermont, qui donnent lieu à des exploitations d'asphalte importantes, et qui présentent, en effet, un rapprochement curieux avec les basaltes de la région. Un sondage à cet endroit aurait été logique. On a préféré en exécuter un sensiblement plus au Nord, à Cellule, près de Riom et une autre également près de Riom à Macholle. En 1896, on est descendu, en ce dernier point, jusqu'à 1134 mètres sans sortir de l'oligocène, dont ce travail a prouvé la très grande épaisseur dans cette fosse de la Limagne. A diverses reprises, ce sondage a rencontré un peu de gaz, à 630 m. des traces de pétrole et enfin, à 1 100 m., de l'eau salée légèrement pétrolifère. Ces hydrocarbures ont des chances pour se rattacher à une formation gypseuse et parfois saline, qui a occupé certaines parties de la Limagne au début de l'oligocène et qui est représentée par de nombreuses traces de gypse, parfois avec un peu de soufre produit par réduction à la surface². Ces dépôts de gypse n'ont nulle part une extension qui puisse donner grand espoir si l'on se fonde sur eux³. Et, d'autre part, la nature des terrains de

¹ Nous rappelons, en ce qui concerne la France, que quelques gisements ayant un âge apparent tertiaire nous ont paru antérieurement devoir être décrits de préférence à l'occasion des chaînes hercyniennes (voir pages 518 à 525).

² Voir plus loin, tome 1, page 610 (asphaltes d'Auvergne) et tome 2, page 193 (gypse).

³ L. DE LAUNAY. *Feuille de Gannat*. — MICHEL LÉVY. *Feuille de Clermont*.

la Limagne, avec leurs grandes masses irrégulières d'arkoses argileuses et les énormes épaisseurs de schistes marneux à minces lits sableux, semble peu favorable à l'accumulation du pétrole en quantités un peu notables même si l'on admet (ce qui n'est pas absolument impossible dans ce cas tout particulier), que les hydrocarbures soient une émanation profonde des basaltes ¹.

Alsace². — Il existe, en Basse-Alsace, autour de Pechelbronn, une région pétrolifère d'une certaine importance industrielle, qui a mis en

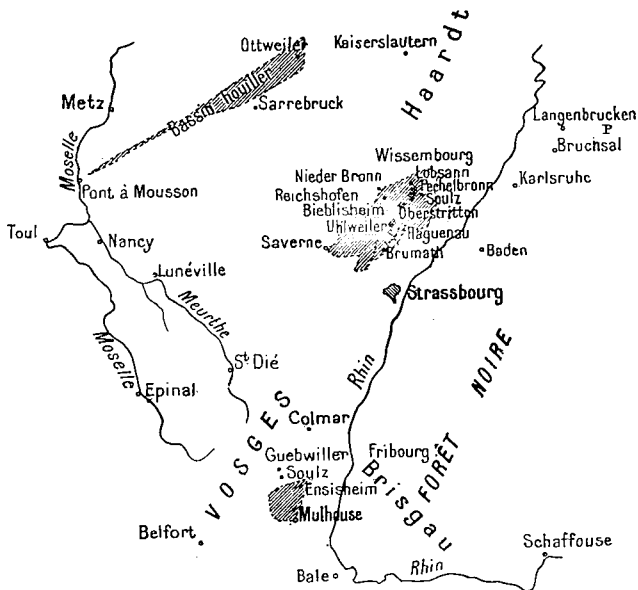


Fig. 74. — Gîtes hydrocarbonurés et potassiques d'Alsace.

évidence, d'une manière très manifeste, cette relation générale entre le pétrole profond et les bitumes ou asphaltes superficiels, sur laquelle nous croyons qu'on a le droit, en principe, de se fonder pour entreprendre ailleurs des recherches. C'est, à cet égard, un cas à rapprocher de ce que

¹ L'acide carbonique, si abondant dans les sources de toute cette région, résulterait alors de leur combustion.

² 1850. DAUBRÉE. *Mémoire sur le gisement du bitume, du lignite et du sel dans le terrain tertiaire aux environs de Pechelbronn et de Lobsann*. — 1871. LE BEL. *Sur les pétroles du Bas-Rhin* (C. R., t. 73, p. 499; Mon. Scient., p. 655; Bull. Soc. Chim., t. 73, p. 164; Wagners Berichte, p. 859). — 1879. L. FAVRE. *Gisements de bitume de Lobsann et de Pechelbronn* (Bull. Soc. Sc. natur., t. 11, p. 122. Neufchâtel, 1879). — 188. CH. GRAD. *Exploitation du pétrole à Pechelbronn en Alsace* (La Nature, 18^e année, p. 171). — 1885. LE BEL. *Notice sur les gisements de pétrole de Pechelbronn* (Bull. Soc. hist. nat. de Colmar, p. 445). — 1893. Pochon. *Sur les pétroles de Pechelbronn et les sables pétrolifères du Credo* (Bull. Soc. Ind. min., t. 7, p. 111-127). — 1895. VAN WERVEKE. *Erdæel in Unter-Elsass*. — 1905. H. MONKE und F. BEYSSCHLAG. *Ueber das Vorkommen des Erdæels* (Z. f. pr. G., p. 3-4 et 65-66). — 1907. L. VAN WERVEKE. *Ueber die Entstehung der Elsässischen Erdæellager* (Mit. d. geol. Landesanstalt von Elsass-Lothringen, p. 1-30). — 1909. VAN WERVEKE. (dans Engler et Hofer, *loc. cit.*, p. 209-233).

nous verrons bientôt à Boryslaw, en Galicie, où la présence de l'ozocérite au voisinage du jour annonçait des niveaux pétrolifères, que l'on a rencontrés surtout à un millier de mètres et plus de profondeur.

La région pétrolifère de l'Alsace est située au N.-W. de Strasbourg et un peu au Sud de Wissembourg (fig. 74). Elle est, par conséquent, bien distincte de la région des sels potassiques que nous étudierons plus tard au Nord de Mulhouse¹. Néanmoins il est possible que ces deux formations, à peu près du même âge, aient, entre elles, un certain lien tectonique.

Les gites bitumineux d'Alsace, déjà décrits en 1849 par Daubrée, comprenaient, à cette époque, des asphaltes à Lobsann, des amas de sables bitumineux à Pechelbronn, Soulz-sous-Forêt, etc. Ces diverses imprégnations bitumineuses ont donné lieu, sous la même forme, pendant trente ans encore, à une petite exploitation. En les étudiant, il était facile d'en conclure, par une induction théorique que nous avons mainte occasion

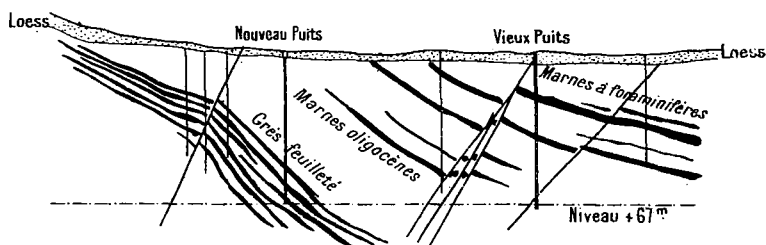


Fig. 75. — Coupe des terrains pétrolifères de Schaweiler (bassin de Pechelbronn). Longueurs au 1/6 200^e; hauteurs au 1/3 110.

de répéter dans ce chapitre, la probabilité d'une formation pétrolifère profonde donnant lieu à des imprégnations superficielles, surtout différenciées par la nature de la roche encaissante. C'est en 1880 seulement qu'on a eu l'idée de vérifier cette hypothèse et de substituer à l'ancienne exploitation des sables bitumineux par puits et galeries, des sondages profonds pour pétrole. On reconnut alors quatre niveaux pétrolifères jusqu'à 223 m. de profondeur et, de 1880 à 1897, près de 600 forages furent entrepris. En 1890, la production du pétrole en Alsace a atteint 23 000 t. Elle reste, depuis ce moment, autour de 20 000 à 30 000 t. (29 726 t. en 1909, pour 3 exploitations occupant 386 hommes). Le seul groupe de Pechelbronn produit environ 6 180 t., dont 4 748 par jaillissement et 1 432 par pompage. Le rendement des sondages est quelquefois de 30 barils par jour, mais n'excède pas d'ordinaire 5 barils. L'huile a une densité de 875 à 890.

Géologie. — Les terrains superficiels, où l'on avait reconnu la présence du bitume, appartiennent au sannoisien. C'est également dans l'oligocène inférieur que le pétrole a été rencontré, et l'on peut ajouter aussitôt que des forages de recherches, entrepris jusqu'à 700 m., sont restés dans le même étage sans donner de résultats fructueux. Si l'expérience ainsi faite devait être considérée comme suffisante, on aurait donc atteint la base de la formation pétrolifère, qui se rattacherait, comme origine, à l'oligo-

¹ Voir tome 2, pages 111 à 113.

cène. C'est la conclusion adoptée par les géologues qui ont le mieux étudié le pays. Pour Van Werveke, le pétrole est à sa place originelle dans le tertiaire. Il n'est pourtant peut-être pas inutile d'y regarder d'un peu plus près.

En plan, le bassin tertiaire pétrolifère de Pechelbronn, Uhlweiler, etc., forme une fosse parallèle à la vallée du Rhin, que limitent par faille à l'Ouest des formations mésozoïques (trias, lias et dogger). Les seuls points où l'imprégnation pétrolifère soit exploitable sont à l'Est de cette faille : du Nord au Sud, le bassin principal de Pechelbronn et Soulz-sous-Forêt, occupant 10 à 12 hectares, ceux de Gunstett, Bieblisheim et Oberstritten (toujours au N. de Haguenau); puis, à l'Ouest de cette ville, à Uhlweiler. Mais les sondages de 1891 ont retrouvé des hydrocarbures à l'Ouest de la faille dans une zone mésozoïque qui va de Wissembourg à Niederbronn, Reichshofen, Buxweiler, Saverne et Wasselnheim, et qui constitue ce qu'on appelle le golfe de Saverne. On y a trouvé un peu de bitume dans les calcaires du muschelkalk; on y a signalé également l'extension des schistes bitumineux à posidonies du lias supérieur.

Quand on reconstitue l'histoire de la région, on voit qu'il y a eu : une série de plissements hercyniens dirigés N.-W., notamment à l'époque westphalienne (d'où l'allongement du bassin houiller de Sarrebruck); puis des mouvements plus localisés aboutissant à une émergence crétacée; enfin un affaissement Nord-Sud commencé au début de l'oligocène, ayant amené, dans la vallée du Rhin, les dépôts saumâtres gypso-salins et bientôt après, si l'on admet la théorie courante, la production du pétrole.

Au début de l'oligocène, la mer est arrivée par l'Ouest dans cet effondrement de la vallée du Rhin. Pendant l'oligocène moyen, elle s'est étendue dans un sens vers la mer Suisse, dans l'autre vers la mer du Nord. Puis tout le système a été soulevé : les massifs des Vosges et de la Forêt-Noire plus que la zone du Rhin intermédiaire. C'est ainsi que nous trouvons là un bassin profond, dans lequel le tertiaire doit reposer sur le jura brun ou dogger et sur le lias, dont les schistes bitumineux peuvent se trouver au moins à 1 200 ou 1 300 m. de profondeur, puis sur le Keuper, le rothliegende et, sans doute, les roches primitives sans interposition de carbonifère. Combien ce tertiaire est profond, on l'a vu, par exemple à Wittelsheim, en Haute Alsace, où un sondage de 1 119 m. n'en a pas trouvé le fond. Dans la région pétrolifère, on peut lui attribuer au minimum 800 m. La coupe de sa partie pétrolifère est la suivante :

COUPE DES CALCAIRES BITUMINEUX A LIGNITES DE LOBSANN

Oligocène	}	Marnes grises et calcaire avec conglomérats	65 m.
		Marnes gris rouge avec conglomérats et lits bitumineux	114
inférieur	}	Marnes grises avec calcaire et conglomérats; à la base, sable bitumineux	81
		Marnes grises et rouges, avec bancs calcaires subordonnés; conglomérats bitumineux et sables pétrolifères	136
Sannoisien.	}	Marnes rouges et dolomie marneuse avec anhydrite	98
		Argiles et marnes bariolées avec conglomérat et bitume	23
(46)			

L'observation des fossiles rencontrés dans les couches associées aux niveaux de pétrole montre un conflit des formations marines à foraminifères venant du Sud avec les formations d'eau douce ou saumâtres venant

du Nord et ce conflit a été considéré comme la cause même du pétrole.

A la base, le niveau des marnes rouges avec anhydrite a paru également très caractéristique, comme limite de la zone pétrolifère. On a donc cherché une relation entre la présence du pétrole et cette position stratigraphique spéciale. Cependant des sondages récents ont, comme nous l'avons dit, reconnu plus bas des traces de bitume associées à des schistes qui ressemblent aux schistes à posidonies du lias¹ ou aux schistes à poissons de l'oligocène moyen. Cette indication montre qu'on s'est peut-être un peu hâté d'affirmer que le pétrole ici n'existait pas en profondeur.

Dans les niveaux exploités, le pétrole, comme le montre notre fig. 75, est en relation avec des bancs sableux inclinés à forme lenticulaire, qui, en plan, sont aussi irréguliers qu'ils apparaissent sur la coupe².

4° ZONE DES CARPATHES (GALICIE, HONGRIE, CROATIE, ROUMANIE)

Historique et disposition d'ensemble des gisements. — L'industrie pétrolifère des Carpathes est très ancienne en Galicie et en Roumanie; dès le xvi^e siècle, elle fournissait à Krosno un moyen d'éclairage; mais elle a longtemps végété, paralysée par diverses causes et surtout par un vice fondamental de la loi minière qui, en Autriche, attribue la propriété du pétrole au propriétaire de la superficie au lieu de la concéder d'une manière rationnelle. Il en résultait, avec le morcellement extrême des exploitations, le manque de capitaux et l'usure qui en est résultée, l'impossibilité de tenter des recherches profondes et de créer des débouchés commerciaux. Puis sont venues des crises de spéculation, qui ont détourné les capitaux sérieux. Mais il est inutile d'insister sur cette période finie, qui n'intéresse plus maintenant que l'histoire. Depuis 1890, l'industrie s'est constituée rationnellement et a pris des développements considérables, aussi bien en Roumanie sur le versant Sud de la chaîne, qu'en Galicie sur le versant Nord, et elle est en train de conquérir, dans l'Europe centrale, un marché qui, géographiquement, lui appartient, mais où de très puissants concurrents s'étaient depuis longtemps établis en maîtres.

Outre l'intérêt industriel que présente par suite l'étude de cette zone pétrolifère, elle va nous offrir un grand intérêt théorique en nous permettant d'examiner et de discuter les relations possibles des gisements hydrocarbonés avec certaines conditions de dépôt stratigraphique propres à une période déterminée de l'époque tertiaire le long d'un géosynclinal sur lequel se sont produits des plissements très accentués.

Nous reprendrons bientôt l'étude plus détaillée de quelques grands districts pétrolifères en Galicie et en Roumanie; mais nous voulons auparavant en montrer la disposition d'ensemble. C'est une occasion pour nous d'insister sur une idée que nous avons déjà émise plusieurs fois, mais qu'il est important, en industrie pétrolifère, d'avoir présente à l'esprit.

La première impression, quand on examine une carte de la zone carpa-

¹ Voir plus haut sur les schistes à posidonies bitumineux de l'Est de la France, tome I, p. 523.

² Centrairement à la règle très générale, on a trouvé, à Durrenbach et Pechelbronn, de l'huile plus légère dans les horizons supérieurs que dans les plus profonds.

thique, où les gisements pétrolifères ont été mis en évidence par un artifice quelconque (fig. 76), est qu'il y a là une grande trainée presque continue sur le versant externe de la chaîne, courbée, comme on le sait, en un S renversé¹.

Les gisements sont, en effet, très nombreux, surtout dans certaines régions et l'avenir en fera sans doute découvrir d'autres encore ; mais leur continuité apparente n'est qu'une illusion, même si l'on envisage les choses d'un point de vue strictement géologique et, à plus forte raison, si l'on considère le côté industriel. En réalité, les gisements pratiquement utilisables sont à des 50 ou 100 km. les uns des autres et la presque totalité de la production carpathique vient, en ce moment, de trois points seulement : Boryslaw et Tustanowice, qui fournissent les 6/7 du pétrole galicien, et Prahova qui donne les 9/10 du pétrole roumain.

Surtout si l'on envisage la question d'un point de vue industriel, il ne faut pas s'imaginer un horizon pétrolifère dans les Carpathes comme présentant une continuité et une constance analogues à celles que les gisements du même genre peuvent offrir, très exceptionnellement, en Pennsylvanie et qui, même pour les couches de combustibles, où elle est plus fréquemment réalisée, ne doit encore être présumée avant la démonstration expérimentale qu'avec de fortes restrictions. Le pétrole, qui donne lieu parfois à de grandes richesses, est en même temps, un élément quelque peu inconstant et aléatoire. Un puits le rencontre, son voisin le manque.

C'est ce qu'on verra mieux et d'une façon plus précise en parcourant la longueur des Carpathes de l'Ouest à l'Est et rappelant rapidement les principaux points d'exploitation, dont quelques-uns ont eu, surtout dans ces dernières années, une très brillante fortune.

En partant de l'Ouest (voir les cartes ci-jointes, fig. 76 et 77), on rencontre d'abord, près de Gorlice en dehors des limites de nos cartes, la ligne pétrolifère de Kryg, Libusza, Lipinki, Kobylanka, Dominikowice, Siary, Sekowa.

C'est à *Kryg* que la maison Mac Garvey a tenté, en 1884, le premier sondage canadien exécuté en Galicie, et le succès de ce sondage a fait de Kryg, pour plusieurs années, le centre de l'industrie galicienne, passé ensuite vers 1888 à Sloboda Rungurska, près Kolomea (à l'autre bout des Carpathes).

Non loin de là, vers l'Est, se trouve l'ancienne région de Jaslo, Krosno, Dukla et Sanok. Le sondage de Bobrka au Sud de *Krosno* a été, vers 1885, un des plus productifs de la Galicie ; puis, sur la même ligne, on a fait, en 1886, les forages de Wietrzno et de Rowne. Tout cet ensemble constitue le champ pétrolifère de *Rogi*, qui vient de prendre, avec les sondages nouveaux à grande profondeur, beaucoup d'importance.

Egalement près de Krosno se trouve Weglowka, où l'on a trouvé, en 1887, un premier niveau superficiel et où des sondages plus profonds ont donné, en 1901, près de 18 000 barils par an et, à l'Ouest de la ville, Potok et Torosowka, où l'on a foré de 1890 à 1893.

En ce point de *Rogi*, où l'on avait exploité autrefois un premier niveau

¹ La région interne ne contient aucune exploitation ; cependant des traces de pétrole et de gaz ont pu y donner lieu à des recherches en Hongrie, voir pages 587 et 619.

presque superficiel, la Naphta Gesellschaft a atteint en 1909, vers 600 à 650 m. de profondeur, un niveau pétrolifère, qui a donné d'abord un wagon par jour et s'est rapidement épuisé. On a alors approfondi de 60 m. et le débit est monté à 3 wagons. Ce débit ayant également baissé assez vite, on s'est décidé à descendre jusqu'à 900 m., et l'on a obtenu,



Fig. 76. — Carte des gisements de pétrole et de sel des Carpathes.

paraît-il, jusqu'à 15 wagons. Il n'est guère douteux que le pétrole provienne là au moins de l'éocène inférieur masqué sous les schistes à ménilite.

Environ 120 km. plus à l'Est se trouve le district célèbre de *Boryslaw*. Boryslaw a passé longtemps pour un type de gisement hydrocarburé dans les argiles salifères du salzhon-gruppe miocène. On n'y exploitait alors que l'ozokérite, qui peut être considérée comme un produit d'altération superficielle du pétrole, concentré dans les fractures de ce terrain supérieur¹. En 1889, Mac Garvey a eu le premier l'idée d'y faire un sondage profond. Le pétrole a été rencontré alors à 650 m. avec une abondance incon-

¹ Voir plus loin, pages 595 à 598.

1909. A ce moment, les puits de Sloboda fournissaient encore 5 à 6 000 t. par an.

De la Galicie à la Roumanie, il y a actuellement une lacune dans la série des exploitations de pétrole. Mais la lacune n'existe pas géologiquement ; car, dans cet intervalle, à environ 100 km. de Kolomea, se trouve l'ancien centre d'exploitation de la Bukowine, *Russ Moldavitzza*, où, à deux reprises, de 1885 à 1890, puis après 1898, on a exploité des niveaux superficiels, qui, d'après l'expérience acquise dans le reste du pays, pouvaient laisser supposer la présence d'autres niveaux plus profonds. Ces niveaux ont été recoupés, en effet, par deux sondages en 1909, mais n'ont pas paru exploitables¹.

Après quoi, au bout de 80 km., on trouve le premier centre pétrolifère roumain, Neamtzu, puis, encore 80 km. au delà, Bacau ; et un peu plus loin, Moinesti. 100 km. au Sud de Moinesti vient Buzeu ; et, enfin, après un dernier intervalle de 60 km., le riche district de Prahova (Boustenari, Campina, Poiana), suivi, presque aux limites de la Transylvanie, par Rimnic Valcea.

Ces districts roumains sont de très inégale valeur et la zone de la *Prahova*, qui atteint 40 km. de largeur, les prime tous de beaucoup. Bien que son essor réel date seulement de 1892 à 1895, elle avait déjà produit, en 1907, 3 600 000 t. de pétrole sur 4 700 000 t., formant le total de la production roumaine et, si l'on considère les dernières années, la proportion est encore plus forte. En 1906, la Prahova seule a produit 846 189 t. sur 887 091 t. : c'est-à-dire que tout le reste de la Roumanie ne compte à peu près pour rien.

En général, les sondages roumains sont encore peu profonds et l'on ne dépasse pas d'ordinaire 350 à 400 m. Un peu sans doute en raison de cette circonstance, mais aussi par suite de la nature des étages géologiques représentés, le pétrole de Roumanie semble, en majeure partie, se trouver dans des terrains plus récents qu'en Galicie. Comme en Galicie cependant, le pétrole se rencontre à peu près dans tous les étages affleurants au jour ou atteints par les travaux, là où ceux-ci offrent des conditions favorables à l'imprégnation : son origine est en profondeur et son apparition superficielle adventive. Mais, en pratique, les affleurements pontiens ou oligocènes donnent, avec la Prahova, la majeure partie de la production.

Vers l'Ouest, les Alpes de Transylvanie renferment encore quelques pétroles au voisinage de leurs districts salifères. Après quoi, si l'on continue à suivre la chaîne plissée, au delà du Danube, dans les Balkans, les affleurements pétrolifères disparaissent totalement. Il peut y avoir lieu de remarquer, sans vouloir en tirer une conclusion précise, que les gisements salifères cessent alors également d'être représentés.

Pour conclure, le tableau 23 montre les progrès de la production galicienne et roumaine et sa répartition.

En 1904, on a foré en Galicie 341 puits dépassant 800 m., dont 36 dépassant 1 000 m. En 1906, il y avait, en Roumanie, 701 puits à main et 425 sondages.

Enfin, l'on estimait en 1906, qu'il y avait 185 millions de francs engagés dans les affaires de pétroles roumaines, dont 74 allemands et 31 français.

¹ Gisements visités en 1905.

TABLEAU 23. — PRODUCTION D'HUILE MINÉRALE DANS LES CARPATHES

		1900	1902	1904	1906	1907	1908	1909	1910
Galicie.	District de Drohobycz (Boryslaw, Schodnitza, Tustanowice).	221	457	656	620	1 010	1 651	2 042	
	District de Jaslo (Rogi)	93	108	162	124	87	68	23	
	District de Stanislaw (Sloboda, Dwiniacz, Starunia) et divers.	12	11	9	96	79	35	85	
		<u>326</u>	<u>576</u>	<u>827</u>	<u>740</u>	<u>1 176</u>	<u>1 754</u>	<u>2 150</u>	
		1903	1904	1905	1906	1907	1908	1909	
Galicie de l'Est	Tustanowice.	9,4	25,6	87,6	287,5	741,4	1318,7	1740	
	Boryslaw	431,6	517,8	454,3	252,3	199	266	236	
	Schodnitza.		72	60	47	39	36	»	
	Urycz, etc.		41	37	33	27	30	»	
		1900	1902	1904	1906	1907	1908	1909	1910
Roumanie	District de Prahova (Campina-Boustenari)	207	267	455	846	1 077,6	1 097	1 221	1 245,3
	Dambovitza	9	15	26	11,6	32,2	26	30	43,3
	Bacau.	3	11	10	10	9,1	14	19	23,9
	Buzeu.	1	4	8	8	9,4	10	25	39,7
		<u>222</u>	<u>298</u>	<u>500</u>	<u>887</u>	<u>1 129</u>	<u>1 147</u>	<u>1 296</u>	<u>1 352</u>

Prix. — Si nous envisageons d'abord le cas de la Galicie, vers 1880 l'huile brute galicienne valait 20 à 30 fr. les 100 kg. Le premier développement des recherches, dans la période 1885-1890, la fit tomber : à 10 fr. en 1887, 8 fr. 1888, 6 fr. en 1890. A ce moment, nombre de petits affaires durent fermer et les prix s'affermirent un moment. Puis vinrent, en 1895, les sondages profonds de Schodnitza. La production galicienne monta subitement de 215 000 à 340 000 tonnes par an. Les consommateurs manquaient ; l'huile brute retomba à 3,75 fr.

Une entente des producteurs fit remonter les prix au-dessus de 7 fr. en 1901. Mais les sondages profonds de Boryslaw amenèrent de nouveau une crise analogue. On retomba entre 3,50 fr. et 4 francs en 1903 et 1904.

Cette baisse tient à la surproduction autrichienne depuis quelques années, malgré les efforts faits pour conquérir une proportion croissante du marché allemand, qui importe chaque année 1 000 000 t. d'huile brute.

L'Autriche a produit : en 1902, 611 000 t. d'huile ; en 1903, 728 000 ; en 1904, 827 000, soit environ 360 000 t. d'huile raffinée, dont 240 000 seulement trouvent leur débouché à l'intérieur du pays. En 1909, on a même atteint 2 150 000 t., mais pour retomber à 1 491 000 en 1910.

En Roumanie, le prix du pétrole brut a varié, de 1902 à 1905, de 3 fr. à 3,50 fr., avec une forte baisse jusqu'à 2 fr. en décembre 1902. Il s'est relevé, au contraire, à 4,50 fr. en décembre 1906. La consommation intérieure est à peine de 150 000 t. et reste à peu près stationnaire en ce qui concerne le pétrole lampant, l'usage des résidus tendant seul à s'accroître.

Il a donc fallu s'organiser pour l'exportation en Angleterre, Allemagne et Autriche. Le pétrole lampant se vend en Roumanie 8 à 10 fr. les 100 kg., plus 19 fr. d'impôts et revient au consommateur à 36 à 38 fr.

Allure géologique de la région carpathique¹. — Les terrains représentés

¹ Coll. Ec. d. M., n° 1790, 1691. — 1865. FOUCON. *Gis. de pétrole des Carpathes* (Mém. Soc. Ing. civils, 3^e trimestre). — 1865. HOSCHTETTER. *Ueber das Vorkom. von Erdöl und*

dans la zone pétrolifère des Carpathes en Galicie sont tous fortement plissés, faillés et parfois renversés. Leur coupe peut se ramener aux termes qui, dans le tableau suivant, vont du crétacé au miocène moyen. Au-dessus viennent, vers la Roumanie, des terrains supérieurs depuis le Sarmatien (52) peu inclinés et non influencés par les plissements, que nous reproduisons ici pour avoir la série complète.

COUPE DES TERRAINS PÉTROLIFÈRES CARPATHIQUES

<i>Pliocène</i> (54)	Couches à paludines.
<i>Miocène supérieur</i> (53, 52)	{ <i>Pontien supérieur</i> ; couches à congéries; grès micacés et argiles.
	{ <i>Pontien inférieur</i> ; méotique roumain: grès et argiles. <i>Sarmatien</i> ; grès micacés et argiles.
<i>Miocène moyen</i>	Schlier; argile salifère (Salzthon Gruppe).
<i>Miocène inférieur</i> (49, 48)	{ <i>Helvétien</i> ; niveau <i>pétrolifère</i> adventif.
	{ <i>Burdigalien</i> . Emersion. Lacune presque générale. Grès de la Majura.
<i>Oligocène ton-grien</i> (46)	{ Grès de Grudek et de Cienzkowice, etc., <i>niveau pétrolifère</i> de <i>Boryslaw</i> .
	{ Schistes à ménilite avec hornstein et poissons. <i>Pétrole de Rogi</i> .
<i>Eocène</i> (flysch) (45)	{ Grès à hiéroglyphes et fucoides, alternant avec des schistes argileux verts et rouges contenant du sel.
	{ Grès tendres, rares pointements de calcaires à nummulites. <i>Niveau pétrolifère</i> de <i>Schodnitza</i> , prolongé dans le supra-crétacé.
<i>Crétacé supérieur</i> (?) (40)	{ Couches de Ropianka, schistes et grès à inocérames avec argiles salifères.
	{ <i>Niveau pétrolifère</i> adventif. Conglomérats, grès et marnes calcaires (Mergel Kalk).

Erdwachs in Sandecer Kreise in West-Galizien (J. der K. K. g. Reichs.). — 1868. NOTH. *Die Erdöl Gruben in Bobrka bei Dukla in Mittel Galizien* (J. d. K. K. g. Reich., t. 18, p. 314). — 1868. HEURTEAU (Ann. d. M., t. 19, p. 197). — 1872. FRANCK. *Petroleum Gewinn in Galizien und Amerika* (Berg. und Hütten Zeitung, 1872, p. 351; Dingler, t. 206, 237; Polytech. Centralblatt). — 1874. FAUCK. *Erdwachs und Petroleum Gruben zu Boryslaw in Galizien* (B. u. H. Z., 1874, p. 446; Pol. Centralblatt, 1875, p. 65). — 1874. WINDAKIEWICZ. *Petroleum Gewinnung in Galizien* (Oest. z. f. B. u. H., t. 22, p. 196 et 350; Chem. Centralblatt, 1875, p. 16 et 832). — 1879. NOTH (JULIUS). *Ueber das Vork. von Petroleum in Galizien* (Hübners Z., 1879, p. 63; W. B., 1879, p. 1192. Oest. Z. für B. u. H., n° 2, 1879, n° 24, 1881, et n° 1, 1882). — 1880. WALTER (BRUNO). *Die Chancen einer Erdölgewinnung in der Bukowina* (J. der K. K. geolog. R., t. 30, p. 115). — 1881. SZAJNOCHA. *Das Petroleum Vork. von Sloboda Rungurska in Ost. Galizien* (Verh. der K. K. geol. Reichs. mars-mai, p. 162). — 1884. WALTNER et DUNIKOWSKI. *Das Petroleum Gebiet der galizischen Westkarpathen* (Geol. Reichs. d'Autriche, p. 20). — 1888. PRZIBILLA et SYROCZYNSKI. *L'ozokérite* (Cuyper, t. 4, p. 17). — 1892. DORION. *Rapport sur le pétrole de Bobka* (Galicie occid.). — 1894. CHESNEAU. *Sur le régime fiscal de l'industrie des huiles minérales en Autriche-Hongrie* (75 p. Impr. nat.). — 1898. ZUBER. *Karte der Petroleum Gebiete in Galizien* (1/750.000°. Leipzig). — 1899. ZUBER. *Geol. der Erdöl Abl. in den Gal. Karpathen* (Verh. d. g. R. A. p. 433-443). — 1899. SZAJNOCHA. *Die Petroleum Industrie Galiziens* (Oest. Ung. Rev., t. 25, 24 p.). — 1899. SZAJNOCHA. *Ueber die Entstehung des Karpatischen Erdöls* (Naphta, Lemberg, 15 p.). — 1899. HADBANK-DUNIKOWSKI. *Das Petroleum Gebiet der Bukowina*. — 1900. OEBEKKE. *Die Bedeutung Galiziens und Rumaniens für die Erdöl Prod.* (Volkswirtsc. u. Handels Beilage zur Allgem. Ztg., n° 27). — 1902. SZAJNOCHA. *Ueber den Ursprung des Erdöls in Wojcza (Polea)* (Anz. d. Ak. der Wiss. Krakau, p. 219-220). — 1906. L. DE LAUNAY. *Les pétroles des Carpathes* (La Nature, n° 1732, 4 août). — 1909. ENGLER et HÖFER. *Das Erdöl*, p. 268. — Revues hebdomadaires: Naphta, etc.

Dans cette série, les calcaires font à peu près complètement défaut. Les conditions de mer un peu profonde n'ont pas été réalisées, en cette région, pendant la période considérée. On voit, au contraire, après une première phase lagunaire crétacée et une série continue de grès à débris végétaux (flysch) renfermant elle aussi des intercalations salines (45), arriver des grès avec schistes oligocènes, puis le niveau très caractéristique des argiles salifères (Schlier), qui marque le développement des caractères lagunaires, suivi bientôt en Galicie de facies continentaux. Nous trouverons plus tard, en Roumanie, les mêmes caractères se perpétuant jusqu'au pliocène.

Le développement de ces argiles salifères du Schlier le long de la zone pétrolifère, non seulement ici, mais sur les longueurs considérables jusqu'en Perse et la relation probable des hydrocarbures avec le sel, sinon dans un même niveau, du moins dans un même cycle de sédimentation, ont donné tout naturellement l'idée de chercher, dans ce niveau du Salzthon Gruppe, l'origine du pétrole et bien des ouvrages donnent encore cette hypothèse comme un fait d'observation à peu près incontestable.

Tant que l'on s'est borné à des sondages peu profonds, cette théorie semblait, en effet, confirmée par des rapprochements nombreux, qui sont particulièrement frappants en Roumanie, mais qui offraient également un caractère d'évidence apparente en divers points de la Galicie, tels que Boryslaw. Aujourd'hui, si l'on veut continuer à admettre la relation du pétrole avec les argiles salifères du Schlier, il faut avoir recours à des hypothèses singulièrement compliquées et, bien que tout soit possible avec l'idée de renversement et de charriage, assez difficiles à admettre. La Galicie est une des régions où l'on a obtenu les résultats les plus démonstratifs en s'approfondissant et où l'on a le mieux vu ainsi les pétroles lourds de la surface aboutissant à l'ozocérite passer peu à peu aux huiles plus légères de la profondeur. On est ainsi descendu, trouvant toujours du pétrole, jusque dans l'éocène et le crétacé, même dans des cas où le Schlier existait à la surface.

En Roumanie, nous verrons de même que, s'il y a association ordinaire du pétrole et du sel, l'étage du Schlier, où se trouvent les amas de sel, est très pauvre en pétrole et ne paraît en contenir que par un déplacement secondaire. La façon dont le pétrole arrive là dans des anticlinaux pontiens, le montre s'élevant manifestement de la profondeur et d'une profondeur indéterminée.

Quelle est alors son origine première? En admettant même la relation du pétrole avec une période de concentration lagunaire, marquée d'autre part par des gîtes de sel, entre les divers niveaux salifères qui se sont succédé sur ce même emplacement des Carpathes, lequel ou lesquels doit-on invoquer?

La présence en Galicie de niveaux adventifs jusqu'à la base du crétacé pourrait faire penser aux argiles salifères du néocomien. Et même, si paradoxale qu'une telle hypothèse puisse paraître, il n'est nullement prouvé que le pétrole ne vienne pas de plus bas encore: par exemple, de schistes bitumineux analogues à ceux que le lias présente dans la Banat. En tout cas, pratiquement, l'huile minérale est en relation évidente avec les bancs de grès poreux un peu épais compris entre des couches imperméables d'argiles ou de schistes dans toute une série de niveaux tertiaires, quel que soit d'ailleurs leur âge.

4° a) GALICIE

Rogi. — En partant de l'Ouest, dans la région de Rogi et Krosno, les terrains présentent une poussée générale vers le Nord et des chevauchements, qui introduisent de nombreuses lacunes avec discordances dans la série. Pourtant la majeure partie des sondages de la région, et notamment ceux de Rogi, paraissent placés sur des anticlinaux de schistes à ménilite (oligocène tongrien, 46), au-dessous desquels l'éocène doit être représenté par des argiles rouges, superposées elles-mêmes au crétacé (couches à inocérames¹).

Le même anticlinal de schistes à ménilite va de Bobrka à Rogi ; il est enveloppé par les grès de Majura, sur lesquels on a foré, plus au Sud, à Kobylany, Wietrzno, Rowne. Plus au Nord, à Krosno, reparait un autre anticlinal de schistes à ménilite. Partout, les sondages de cette région trouvent le pétrole entre les argiles rouges éocènes (45) et les schistes à ménilite (46).

Boryslaw, Schodnitza, Tustanowice. — Les exploitations de Boryslaw ont, jusqu'en 1899, porté exclusivement sur l'ozocérite dont nous dirons quelques mots plus loin² : ozocérite associée aux argiles salifères avec gypse (49). Depuis, on y a fait, comme nous l'avons vu, des sondages de plus en plus profonds. Les coupes des travaux montrent comment les sondages de Boryslaw vont aujourd'hui chercher le pétrole dans les grès dits de Dobrotow (niveau de la Majura, 46), surmontés par les argiles salifères et superposés au contraire aux schistes à ménilite. Dans d'autres régions, on avait trouvé, sous ces schistes à ménilite, des venues si fréquentes de pétrole, qu'on avait cru voir là un horizon stratigraphique. Il semble, au contraire, ici que la localisation du pétrole dans les grès oligocènes se soit faite d'une façon purement mécanique, en raison de leur intercalation entre des schistes et des argiles.

L'éocène (45) n'a pas été encore atteint par les sondages de Boryslaw même ; mais c'est au moins de lui, si ce n'est de plus profondément, que vient le pétrole.

Vers le Sud, à *Schodnitza*, les sondages recherchent en majorité un étage de grès éocène (45) et descendent occasionnellement dans des couches à inocérames crétacées (40). Enfin, dans la région intermédiaire à Buchowy Dzial, ce sont encore ces couches à inocérames qui donnent le pétrole.

Les argiles salifères miocènes de cette région (49) renferment quelques gites de sel exploités à Drohobycz et à Stebnick ; elles alimentent aussi des sources salées. Leurs parties gréseuses contiennent fréquemment du pétrole. C'est en partant de là que l'on s'est enfoncé de plus en plus profondément (une profondeur de 1 000 à 1 100 m. étant aujourd'hui courante). Plus on s'enfonce, plus en moyenne l'huile devient légère et abondante, sans qu'on puisse l'établir en règle absolue. Mais, d'une façon générale, les huiles de Boryslaw sont si riches en paraffine que l'on évite de tuber la couche pétrolifère pour ne pas avoir d'obstruction dans les crépines.

¹ Voir feuille Jaslo-Dukla de la carte géologique au 75.000° ; révision de 1891 par le Dr W. Szajnocha. L'ouvrage d'Engler contient la description de nombreux gisements galiciens.

² Tome 1, p. 597.

Schodnitza a eu sa grande période de prospérité de 1894 à 1901 et l'on a fait alors plus de 500 sondages. Puis Boryslaw a été très prospère de 1901 à 1906. En 1907, ce district a semblé à son tour presque épuisé et l'on s'est porté un peu à l'Est vers Tustanowice-Truskawice, où l'on a atteint, en 1907, 872 m. de profondeur.

Sloboda. — A Sloboda Rungurka on a travaillé surtout de 1884 à 1894. Les sondages n'ont pas dépassé 500 m. et ont trouvé, comme en bien des points de la Galicie, plusieurs niveaux de pétrole dans des grès durs intercalés entre des schistes éocènes (45).

Résumé. — En résumé, on voit, comme nous l'annoncions, que, sur les grands centres productifs comme Rogi, Boryslaw, Schodnitza, Sloboda, où l'on a exploré la profondeur, on trouve en descendant une série de niveaux, que l'on divise un peu artificiellement en deux ou trois horizons séparés par des nappes d'eau salée. Du haut en bas, l'huile présente, sur le même point, certaines propriétés analogues, par exemple l'abondance de paraffine à Boryslaw et, à mesure que l'on descend, les niveaux gagnent très habituellement en abondance, tandis que le pétrole perd de sa densité.

Dans quelque cas, il est vrai, arrivé à une certaine profondeur, on a cessé de rencontrer du pétrole ; mais, comme, à tous les niveaux, il arrive de traverser, sur plusieurs centaines de mètres, des couches stériles, il est impossible d'en conclure que l'on est arrivé au fond de la formation pétrolifère et l'hypothèse contraire demeure même vraisemblable.

Reste à considérer ce fait que, de la base du crétacé à la fin du miocène, des conditions de dépôts analogues, fréquemment favorables aux concentrations salifères, se sont reproduites : ce qui pourrait à la rigueur laisser supposer des récurrences multiples de venues pétrolifères. Nous ne croyons pas néanmoins que l'on puisse expliquer de cette façon la série des nombreux niveaux reconnus, trop directement en rapport avec la structure plus ou moins poreuse des couches où on les rencontre et présentant toutes les apparences d'une imprégnation postérieure venue d'un niveau plus profond.

4^e b) HONGRIE ET CROATIE¹

Avant de passer aux pétroles roumains, il peut y avoir un intérêt théorique à mentionner la présence du pétrole en quelques points à l'intérieur

¹ 1884. C. VON JOHN. *Unters. zweier ungarischer Rohpetroleum Vorkommen* (Verh. der K. K. geol. R., n^o 2-6, p. 53. Vienne). — 1885. NOTH. *Ueber die bisher erzielten Resultate und die Aussichten von Petroleum Schürffungen in Ungarn* (Budapest, 1885). — 1887. NOTH. *Bergtheer und Petroleum Vork. in Kroatien, Slavonien und im S. W. Ungarn* (Foldtani Koszlonoy. Budapest, t. 7, p. 348). — 1897. *Das Petroleumgebiet von Körösmezö (Marmaros)* (C. R. : Z. f. pr. G., p. 333). — 1897. ROTH v. TELEGD. *Studien in Erdöl fürh. Ablagerungen Ungarns (Zsibo)* (Mit. a. J. d. d. geol. Reichs. Budapest, p. 259-298). — 1897. GESELL. *Das Petroleum Gebiet von Luh und das Goldbergwerk von Verospalack* (J. d. K. ung. geol. Anst. p. 164-171). — 1899. *Die Kohlenwasserstoff Quellen Siebenburgens* (Z. f. pr. G., p. 413). — 1901. V. ADDA. *Geol. Aufnahmen im Interesse von Petroleum Schürffungen im Com. Zemplen, in Ungarn* (Mit. a. d. J. d. K. Ung. geol. Reich., t. 12, p. 265-319). — 1901. OLSZEWSKI. *(Sur le pétrole de Laborectfus à Radwang, Oberungarn)* (Z. f. pr. G., p. 353-358). — 1911. *Sources de gaz naturel en Transylvanie* (La Nature, n^o 1989, 8 juillet).

de la courbure des Carpathes, bien qu'il n'y ait été nulle part reconnu exploitable. A vrai dire, beaucoup de points répondant à cette condition géographique sont, dans les Carpathes mêmes, au voisinage immédiat des pétroles galiciens : par exemple au S.-W. de Boryslaw sur la Lopuszanka à Uzsook, Sztavna, etc., ou au voisinage des pétroles roumains dans les environs d'Hermannstadt. Quelques-uns sont cependant plus éloignés vers le Sud, comme Marmaros Sziget (connu également pour ses gites de sel) et la région N.-E. de Grosswardein (Tataros, Bodonos, etc.).

En 1909, on a découvert (comme nous le verrons plus loin ¹) d'importantes sources de gaz méthane près de Kissarmas, à environ 50 km. de Kolozsvár en *Transylvanie*. Ces gisements semblent en rapport direct avec les formations salifères.

Dans une région toute différente, on avait signalé autrefois du pétrole autour de *Kopreinitz* (au N.-E.) d'Agram), dans une région où les marnes et argiles pliocènes recouvrent les argiles salifères du miocène.

4^o c) ROUMANIE ²

Généralités. — Les tableaux 21 et 23 ont déjà montré l'énorme développement récent des pétroles roumains qui, de 250 000 t. en 1900, ont passé à 1 352 000 en 1910. Ils ont également mis en évidence le rôle à peu près exclusif joué dans cette production par un seul district, celui de la Prahova. Géologiquement, il existe bien d'autres affleurements pétrolifères en Roumanie et, sans doute, dans quelques années, on verra se produire, pour ce pays, des déplacements industriels analogues à ceux que l'on a observés en Galicie. Le peu de profondeur actuel des sondages peut donner à cet égard des espoirs qu'il est difficile de préciser. Mais, en pratique, la Prahova fournit seule, et de plus en plus exclusivement, la production roumaine. C'est donc sur ce district que nous insistons, sauf à commencer par des indications plus générales.

Stratigraphie du pétrole en Roumanie. — La coupe géologique des terrains de Roumanie comprend une série analogue à celles des Carpathes avec addition de termes supérieurs plus développés. Le miocène plissé (helvétien ou schlier inclus, 49) y est recouvert par des couches peu incli-

¹ Tome 1, p. 619.

² 1867. COQUAND. *Sur les pétroles de Moldavie et Valachie* (B. S. G. F., 2^e série, t. 24. — 1868. CAPELLINI (Giovanni). *Giacimenti petroliferi di Valacchia* (Bologne, 1868, analysé dans les Ann. d. M., 6^e série, t. 14, p. 532). — 1878. FRETWEL. *Petroleum in Roumania* (J. of the Soc. of arts, t. 26, p. 481). — 1884. PAUL. *Ueber Petroleum Vork. in der nördlichen Walachei* (Ver K. K. g. R., mars-mai, p. 93). — 1897. STEFANESCU. *Thèse sur les terrains tertiaires de Roumanie* (Paris). — 1897. OCHSENIUS. *Petroleum und Salz in Rumanien* (Z. f. pr. G., p. 23, 224, 317 ; cf. *ibid.*, 1898, p. 35). — 1900. COUCOU. *Les pétroles de Roumanie* (Congrès intern. du pétrole, 21 p.). — 1904. MRAZEC. *Distr. géol. des zones pétrol. en Roumanie* (Mon. des int. pét. roum., p. 271-284). — 1905. ARON. *L'expl. du pétrole en Roumanie* (Ann. d. M.). — 1907. *Travaux du 3^e Congrès international du pétrole à Bukarest*. — 1909. TASSART. *Le pétrole*, p. 336. — Moniteur des intérêts pétrolifères roumains depuis 1900. — Le mémoire de Aron, les ouvrages généraux de Tassart et d'Engler permettent de compléter aisément les détails que nous n'avons pas la place de donner ici.

nées de sarmatien (52), de pontien (couches à congéries, 53) et de pliocène (couches à paludines, 54). Les couches à congéries du pontien représentent un type lagunaire que nous allons retrouver en Italie sous le nom de formation sulfo-gypseuse¹ et dans lequel se manifeste une dessalure croissante aboutissant aux couches à paludines. C'est donc un facies saumâtre de plus à ajouter à tous ceux que nous avons déjà vus se succéder le long de la chaîne Carpathique depuis le début du crétacé, et, si l'on se bornait à cette indication, l'on pourrait se demander, en y trouvant ce pétrole si abondant à la Prahova, si celui-ci est là en place dans sa strate originelle. Mais le pétrole a été constaté, en outre, dans toute une série d'autres terrains plus anciens : dans le sénonien de Prahova et Dambowitza ; dans l'éocène supérieur et la base de l'oligocène à Neamtsu et Bakau en Moldavie ; dans le miocène salifère à l'Ouest en Olténie ; ou, plus haut, dans le pliocène à Buzeu². Sur la Prahova même, on a reconnu, suivant la règle ordinaire dans les Carpathes, la continuation et l'enrichissement des venues pétrolifères sur une même verticale avec des sondages de plus en plus profonds.

Tectonique du pétrole roumain. — Les terrains précédents ont subi une série de plissements, qui se sont manifestés depuis le début du sarmatien jusqu'au pliocène. Leur maximum d'intensité se produit précisément dans la zone la plus pétrolifère. Vers le Nord, en Haute Moldavie, l'helvétien peu plissé (50) est séparé par une faille du sarmatien horizontal (52). A la courbure de l'axe carpathique, en Mounténie, au contraire, vers Ploesci, le sarmatien et le pontien participent en concordance à tous les mouvements de l'helvétien salifère.

La coupe de la chaîne roumaine montre ainsi, du Nord au Sud : 1° une région des montagnes avec axe de schistes cristallins, îlots de terrains secondaires rattachés au phénomène des Klippe, série plissée des terrains gréso-schisteux du crétacé ou du flysch et des schistes à ménilite ; 2° une région des collines, ou subcarpathique, qui est la région pétrolifère avec helvétien salifère, sarmatien, pontien et pliocène ; enfin 3° une région des plaines composée d'alluvions quaternaires et de néogène allant jusqu'à Bukarest. Cette localisation du pétrole exploitable dans la zone subcarpathique correspond également à sa position en Galicie. Pratiquement, on le rencontre, là où sa zone est la plus étendue à la Prahova, sur 40 km. de large.

Les terrains à pétroles sont très plissés, avec des renversements et des failles, auxquels il faut songer pour expliquer certaines imprégnations anormales.

Relation du pétrole avec le sel. — Nous avons fait observer, d'une façon générale, la relation si fréquente du pétrole avec le sel. On la retrouve, jusqu'à un certain point, en Roumanie comme en Galicie et les grandes salines de Slanic et de Tirgu Ocna ne sont pas très éloignées de la Prahova. Mrazec, qui s'est particulièrement attaché à faire ressortir cette relation, à montré en Roumanie quatre groupes salifères : 1° à Tirgu Ocna ; 2° sur le haut cours du Rimnic-Sarat ; 3° sur le Verbileau (Slanic) ;

¹ Voir, plus haut, tome 1, p. 332 et, plus loin, tome 1, p. 563 et tome 2, p. 193.

² Nous renvoyons particulièrement, pour les détails géologiques, aux travaux de Mrazec.

4° sur l'Oltu (les deux médians, qui tendent à se fondre ensemble, étant les plus développés) et a fait voir que chacun de ces groupes est accompagné d'un groupe pétrolifère : la même interruption de 100 km. se produisant, pour une substance comme pour l'autre, entre le 3° et le 4° groupes (Verbileau et Oltu). Il peut y avoir du vrai dans cette remarque. Néanmoins il serait inexact de lui attacher un caractère de généralité et surtout de relation stratigraphique directe et précise qu'elle ne comporte pas. Les grandes salines hongroises de Maros Ujvar, Zalathna, Marmaros ne sont pas dans des zones pétrolifères. Par contre, la formation du Schlier, tout en offrant des indices de pétrole comme tous les autres étages géologiques représentés dans les Carpathes, ne contient aucun gisement important. La zone carpathique ne nous permet donc aucune conclusion précise à cet égard, non plus qu'en ce qui concerne l'âge des gisements pétrolifères.

Région de Campina-Boustenari-Poiana. — La grande production roumaine est, comme nous l'avons dit, fournie par la région de Campina-Boustenari sur la Prahova, où les sondages

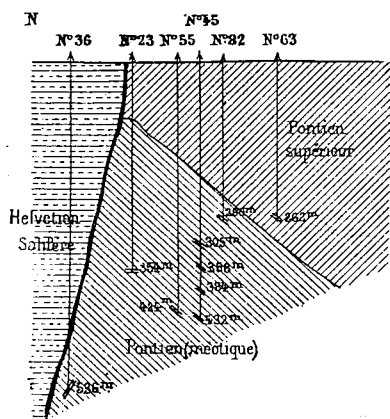


Fig. 78. — Coupe des terrains pétrolifères de Campina. Région de Gaitha.

et puits presque juxtaposés ont l'aspect le plus original. On a là (voir la fig. 78) un anticlinal pétrolifère formé de ce qu'on appelle le méotique, c'est-à-dire la base du pontien. Au-dessus viennent, sur le flanc Sud, les couches à congéries du pontien supérieur. Au Nord au contraire, une faille met en contact avec l'helvétien salifère, qui est ici tout à fait improductif. Le pendage est : au Nord, de 70°; au Sud, de 39 à 40°. Longtemps le versant Nord a été considéré comme seul productif; puis on a travaillé également sur le versant Sud. L'origine profonde du pétrole ne saurait guère être contestée, bien que la production la plus

régulière soit venue de l'oligocène. La largeur de la zone utile est de 600 à 800 m.

Les sondages, exécutés par le procédé canadien, descendent rarement au delà de 400 m., quelquefois pourtant à 600 m. On fait, en outre, un grand nombre de puits creusés à la main de 80 à 100 m. Le rendement, comme la durée des puits, sont extrêmement variables d'un point à l'autre. En 1903, il y avait 294 puits à main productifs entre 80 et 236 m. de profondeur (sur un total de 779 puits) et 69 sondes productrices entre 159 et 590 (sur un total de 230). Le rendement moyen par puits et par mois pour toute la zone était de 33,4 t. ; par sonde, on atteignait 199 t.

Le pétrole roumain se rapproche, en général, beaucoup du pétrole russe. La majeure partie de la production (Campina, Boustenari, Solontz) se maintient entre 830 et 860, avec une proportion de 35 à 40 p. 100 d'huile lampante. La teneur en paraffine va de 0 à 6 p. 100. La fluorescence verdâtre est un caractère assez général.

5° ITALIE (EMILIE, CHIETI¹)

Le versant Nord-Est des Apennins contient, dans l'Emilie (provinces de Plaisance, de Parme et de Modène), des ressources en hydrocarbures d'un certain intérêt géologique. On retrouve également des hydrocarbures, sous la forme d'asphaltes, dans les Abruzzes, le bassin de l'Amaseno, (province de Chieti) et la Sicile (Ragusa). Seuls, les pétroles des Apennins ont une petite production industrielle montant à 8.326 t. en 1907, 7.088 t. en 1908, 7.069 t. en 1910 ; mais les gisements de Ragusa et du Valle del Pescara, sur lesquels nous aurons à revenir², constituent, pour l'asphalte, une importante industrie, qui s'est puissamment développée dans ces dernières années (162.000 t. en 1910 contre 45.000 en 1890).

Géologie. — Bien que les gisements hydrocarbures d'Italie aient, à l'exception des asphaltes, fort peu de valeur pratique, ils sont à examiner avec soin comme l'un des cas où la théorie de l'origine éruptive ancienne est la plus soutenable et s'appuie sur les arguments les plus spécieux. On peut se fonder ici, pour la défendre, sur la relation de position qui existe entre les gisements de pétrole et la zone des roches vertes, sur l'assimilation des dégagements de gaz combustibles avec les fumerolles volcaniques, sur la présence d'hydrocarbures au voisinage de certains gîtes mercuriels, etc.³. D'autre part, les géologues italiens considèrent, en général, leurs pétroles comme en rapport avec les terrains de la base du miocène, bien que les hydrocarbures aient envahi l'éocène et aient donné des asphaltes dans les calcaires crétacés, ou même jurassiques. Cette dernière difficulté vient déjà d'être rencontrée dans les Carpathes.

Si nous commençons par discuter brièvement cette question générale, il est à remarquer qu'une relation locale de manifestations hydrocarbu-

¹ 1868. FAIRMAN. *Upon the disc. of springs of oil in Italy* (Ing., t. 25, p. 243 ; Mon. Scient., 1868, p. 519). — 1870. FOUQUÉ et GORCEIX. *Rech. sur les sources de gaz inflam. des Apennins et des Lagoni de la Toscane* (Ann. des Sc. géol., t. 2, p. 1. Rev. des Deux-M., 1^{er} avril 1871). — 1870. JUGLER. *Vork. von Petroleum in Parma und Modena* (B. u. H. Z., 1870, p. 44 ; W. B., 1870, p. 703). — 1874. MOFFAT. *On the bituminous Dep. of the valley of Pescara* (South Italia) (London Chem. News, t. 30, p. 255). — 1877. BIDOU. *Gis. des bitumes, pétroles, etc., des provinces de Chiétri et Frosinone et traitement à Letto Manopello* (In-4^o, à Sienne). — 1886. *Notizie sulle miniere asfaltiche di Letto Manopello, etc.* (Napoli, tip. Giannini, 22 p.). — 1892. *Relazione sul servizio minero d'Italia*, p. 7 à 57. Description des pétroles italiens, avec carte. — 1895. C. VIOLA. *Das Saccotal und das Vorkommen von Asphalt bei Castro dei Voloci in der Provinz Rom* (Z. f. pr. G., g. 204). — 1899. L. DE LAUNAY. *Sources thermo-minérales* (Béranger), p. 354 à 360 sur les sources salines et pétrolifères de l'Emilie, avec bibl. — 1899. PRATO. *Petroli ed eman. gazoze nelle prov. di Parma e Piacenza. Bibliografia* (Parme, 38 p.). — 1906. L. DE LAUNAY. *La Métallogénie de l'Italie*, p. 135). — 1909. TASSART. *Loc. cit.*, p. 389 à 396. — 1911. E. CAMERANA et B. GALDI. *I giacimenti petroliferi dell'Emilia* (mem. desc. d. Carta geol. d'Ital., t. 14, 334 p. et atlas).

² Tome 1, p. 615.

³ Nous avons discuté cette question et décrit les principales sources pétrolifères d'Italie dans notre traité des *Sources thermo-minérales*, p. 354 à 360. Fouqué a montré autrefois que, suivant la température des dégagements hydrocarbures, on pouvait avoir une série continue depuis les gaz inflammables d'Amérique jusqu'aux gaz de Santorin et d'Islande. Avec la progression de la température, le degré de carburation diminue et l'on se rapproche des types volcaniques, où apparaît l'hydrogène, avec très peu de gaz des marais.

rées avec les roches vertes est parfaitement possible, même si l'on admet, en général, l'hypothèse organique, de même qu'en Auvergne, nous constaterons une autre relation apparente des hydrocarbures avec les basaltes¹. Ce n'est pas seulement dans les Apennins, c'est en bien d'autres points du monde que l'on a trouvé des pétroles au contact de serpentines ou d'ophites². Il reste maintenant à se demander si cette relation ne tient pas aux caractères spéciaux que présentent souvent les sédiments associés avec ce genre de roches : facies flysch dans les Apennins, en Dalmatie, dans les Antilles, les Indes hollandaises ; trias gypso-salin dans les Pyrénées, etc. En moyenne, nous retrouvons en Italie une certaine conformité des zones à hydrocarbures avec les zones gypso-salines et, comme nous l'avons déjà dit, les observations de ce genre offrent un caractère de généralité qui porte à leur attribuer une importance toute spéciale. Mais il nous paraît impossible, ici comme dans les Carpathes, de chercher l'origine unique du pétrole dans la principale formation gypso-saline, qui, dans le cas présent, est d'âge pontien (53), alors que le pétrole se rencontre constamment au voisinage, dans des terrains plus anciens, avec une tendance ascendante. Nous ne voyons pas non plus, dans la base du miocène, le niveau salin originel qu'on a parfois supposé, et nous serions portés à faire venir le pétrole de beaucoup plus bas dans cette série de dépôts argileux, gréseux ou conglomératiques, à caractère si souvent lagunaire, qui se sont succédé pendant de longues périodes, au moins depuis l'éocène et, sans doute, déjà antérieurement, pendant le crétacé³.

Les zones à hydrocarbures italiens mentionnées plus haut sont au nombre de trois principales : Apennins entre Plaisance et Modène (Emilie), Campagne romaine, Sicile.

Emilie. — Les gîtes pétrolifères de la province de Parme forment une longue bande de près de 200 km. de long sur le Nord-Est des Apennins, depuis Barlasco à l'Ouest de Plaisance jusqu'à Pazzano à l'Est de Modène. Industriellement, le peu qu'il y a d'exploitation est concentré à Velleja (4.075 t. en 1910) et à Montechino (5 716 t. en 1910 contre un maximum de 7.013 t en 1907).

La région est formée d'un triple étage de terrasses, parallèles dans leur ensemble à la mer. La plus haute, dont les points saillants se trouvent à 2.000 m. et dont l'altitude moyenne est de 1.200 m., forme la crête centrale des Apennins (fig. 79). Cette terrasse supérieure est constituée principalement par du terrain éocène. La seconde (altitude moyenne, 800 m.) est miocène. La troisième (altitude, 400 m.) pliocène.

La zone pétrolifère est à cheval sur les deux bandes inférieures.

Les coupes du tertiaire dans l'Italie centrale peuvent se résumer à peu près comme suit :

¹ Tome I, page 610.

² Cordillère des Caraïbes, îles de la Sonde, Chimère de Lycie, etc. Voir plus haut p. 520, 541, 542, et, plus loin, p. 580, 592, etc.

³ La conclusion récente de E. CAMERANA et B. GALDI est également que le pétrole de l'Emilie vient de plus bas que les « argile scagliose » longriennes et n'a pas de rapport direct avec des gisements salins, mais qu'il se rattache, au contraire, pour une cause quelconque, avec les apparitions des roches vertes ophiolitiques.

COUPE DU TERTIAIRE DES APENNINS

Pliocène	}	(56) <i>Sicilien</i> : sables jaunes et roux.
		(55) <i>Astien</i> : marnes bleu turquoise subapennines.
		(54) <i>Plaisancien</i> : mollasses, conglomérats, marnes à gypse.
		(53) <i>Pontien</i> : couches à congéries. Formation gypso-solfifère de Toscane et de Sicile.
	}	(52) <i>Sarmatien</i> : couches de Stazzano.
Miocène		(51) <i>Tortonien</i> : marnes bleues de Tortone.
		(50) <i>Helvétien</i> : calcaires gréseux, grès et mollasse (époque du Schlier carpathique) ; discordance principale.
	}	(49) <i>Burdigalien</i> : { marnes sableuses avec conglomérats ophiolites, sables et grès.
		(48) <i>Aquitainien</i> : {
Oligocène	}	(47) <i>Stampien</i> : conglomérats granitiques et mollasses à lignites.
		(46) <i>Tongrien</i> (ancien priabonien) : argiles écailleuses et calcaires à fucoides (type flysch), marnes de Priabona et de Brendola.
Eocène	}	(45) — { Calcaires albarese avec zones serpentineuses à minerais de cuivre et phtanites.
		{ Grès macigno.

Par un autre rapprochement avec les Carpathes, dans cette coupe où les niveaux géologiques représentés sont si divers, tous ceux qui se présentent à l'état de sables, grès poreux ou conglomérats, intercalés entre des couches argileuses, peuvent, quel que soit leur âge, depuis l'éocène jusqu'au pliocène supérieur, renfermer du pétrole.

C'est ainsi que les sondages principaux de Velleja sur le Chero, de Salso Maggiore, Néviano de Rossi, etc. portent sur les marnes subapennines (55), tandis que, vers la crête des Apennins, à environ 1.100 m. d'altitude, les gisements de Corniglio, Barigazzo, Porretta etc. sont sur le tongrien (46) ou l'éocène (45).

Les points principaux, où l'on a constaté ou exploité des hydrocarbures, sont, du N.-W. au S.-E., les suivants :

Nous trouvons d'abord, dans la province de Plaisance et dans la vallée du Riglio, *Bettola*, où plusieurs puits, forés vers 1887, ont donné jusqu'à 900 litres de pétrole par jour. Puis vient, dans la vallée du Chéro, *Velleja*, qui a eu une courte période de prospérité relative, mais a fortement baissé en 1907. On y a foré environ 150 puits ayant en moyenne 250 à 300 m. de profondeur, et atteignant, dans deux cas, 1.000 m. 14 puits ont été encore forés en 1907. Le pétrole vient des grès éocènes très disloqués et recouverts par l'oligocène. La production de 1910 a été de 1 075 t. : soit 0,627 t. par mètre de forage et par an.

Montechino est dans les communes de Gropparello et Bettola. On y a foré, en 1907, 28 puits de 215 m. de profondeur moyenne. Quelques-uns, poussés à 420 ou 450 m., ont donné 1.500 à 3.000 litres par jour. Environ 250 m. de marnes à fucoides (46), avec intercalations sableuses, recouvrent les argiles éocènes. Les terrains sont fortement plissés.

Vers le Sud-Est, dans la province de Parme, le groupe de *Salso-Minore* et *Salso-Maggiore* a donné lieu à des sondages ayant atteint 700 mètres. Ces sondages étaient provoqués par la présence de sources salines et de gaz combustibles. On n'a obtenu, pour le pétrole, aucun résultat à Salso-Maggiore. A Minore, on a eu, pendant quelque temps, une centaine de

litres par jour en deux puits. Le sondage a fait disparaître un volcan de boue qui était en activité auparavant.

A Ozzano et à Miano, à Fornovo di Taro, à Neviano de Rossi, divers sondages ont porté sur les argiles bleues de l'astien (55), donnant seulement des traces de pétrole, bien qu'on soit descendu jusqu'à 400 m. en certains points. Plus loin encore, on peut remarquer que la zone solfifère de la Romagne et de la Marche, où l'on croit reconnaître l'influence réduc-

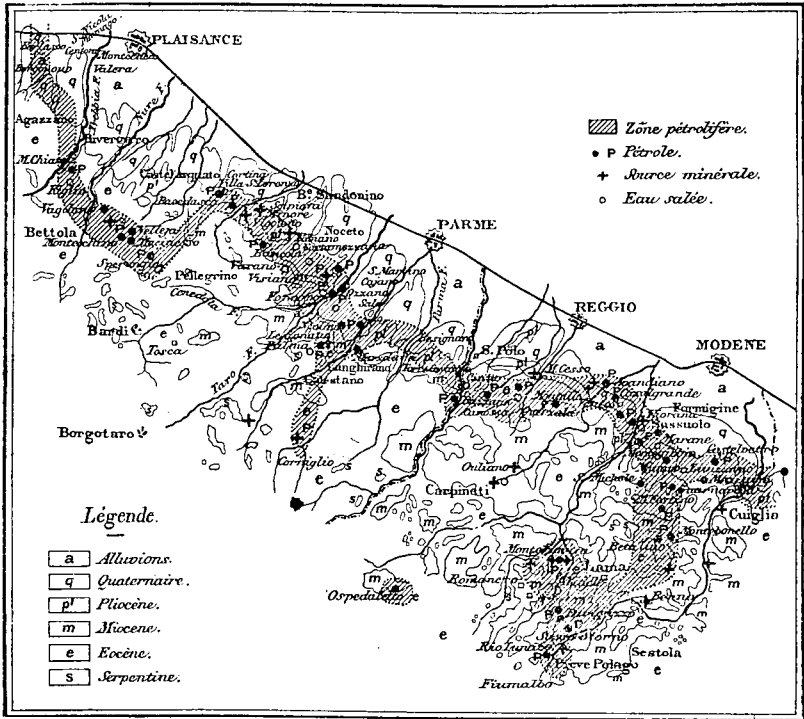


Fig. 79. — Carte géologique de la zone pétrolière de l'Émilie.

trice des hydrocarbures sur les gypses, prolonge directement la zone pétrolière de l'Émilie.

En résumé, les traces de pétrole sont incontestablement très fréquentes dans les terrains des Apennins, et nous aurions pu les suivre davantage dans les provinces de Bologne et de Modène. Mais la conclusion pratique, qui semble résulter des tentatives déjà fort nombreuses faites dans cette région, est peu favorable. Il semble y avoir plutôt minces venues très dispersées que grandes concentrations utilisables ; et l'allure très disloquée, très peu homogène, des terrains n'est pas pour infirmer cette impression.

On peut seulement, à titre d'encouragement vague pour l'avenir, se rappeler la remarque précédemment faite sur la localisation très restreinte des centres vraiment riches dans une chaîne de ce genre, où le pétrole apparaît d'abord un peu partout et espérer qu'on finira par rencontrer plus tard un tel gisement où le pétrole sera mieux concentré.

Les gisements de calcaire asphaltique, qui, pour nous, ont une relation directe avec le pétrole, présentent, dès à présent, dans les Abruzzes et en Sicile, une importance industrielle de nature à attirer l'attention.

Asphaltes du Valle del Pescara (Chieti)¹. — Ces asphaltes sont dans une région de l'Italie toute différente de celle que nous venons d'étudier, à au moins 300 km. de distance, sur le même versant Est de la chaîne. La Pescara, qui se jette dans l'Adriatique, un peu à l'Est de Chieti, présente diverses indications hydrocarburées. Ce sont, d'abord, les suintements de pétrole de *Tocco*, près de Manopello. Là, les fissures de divers terrains tertiaires sont cimentées par du bitume à Valle Romano, Pianto dei Monachi, etc., surtout dans certains calcaires tufacés ou lumacelles de l'éocène, en contact par failles avec des marnes pliocènes. Diverses sociétés (Reh. e C^o, Neufchâtel asphalté C^o. etc.) ont organisé l'exploitation en ce point pour obtenir, ou du calcaire asphaltique, ou du bitume,

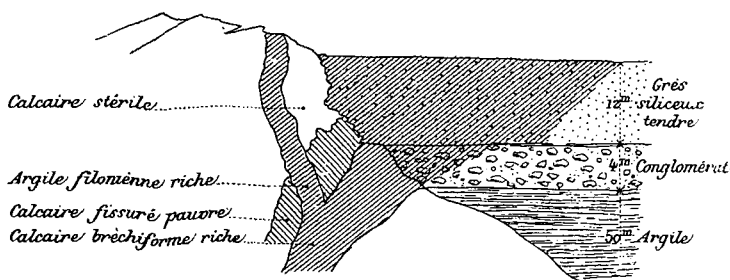


Fig. 80. — Coupe du gîte d'asphalte de l'Amaseno
(Les hachures // indiquent les parties bitumineuses.)

suivant que l'imprégnation s'est répartie dans la masse, ou a pris une allure homogène².

Si, de Manopello et Tocco, par la ligne de Chieti à Rome, on franchit la crête, on trouve, dans la région du lac Fucin, un autre groupe asphaltique, celui de l'Amaseno, ou du Liri, qui a pu originellement ne faire qu'un avec le précédent.

Asphaltes et bitumes de l'Amaseno (province de Rome). — L'Amaseno est un affluent du Liri qui descend du lac Fucin vers la baie de Gaète.

On trouve, dans sa vallée, d'après E. Fuchs, des calcaires crétacés et des terrains tertiaires en contact imprégnés par des émanations bitumineuses, et chacun a retenu une proportion de bitume variable suivant son état physique et sa perméabilité.

Les gisements se composent d'une série de cheminées (fig. 80) traversant le calcaire et les terrains tertiaires, cheminées remplies de brèches calcaires ou d'une argile détritique très riche. Ces sortes de filons s'épa-

¹ Coll. Ec. d. M., nos 1725 et 1789. — Voir une carte dans ENGLER, *loc. cit.*, p. 180.

² La production de 1910 a été de 42 212 t. de roche asphaltique à 10,80 fr. la tonne et 457 t. de bitume brut à 15 fr. la tonne.

nouissent dans les grès tertiaires et donnent naissance à de véritables couches bituminifères.

Il y a également des pétroles dans la vallée du *Liri*, sur le méridien de Gaete et du lac Fucin près San Giovanni Incarico, en relation avec des asphaltes que l'on voit : à Colle San Magno au N.-E. ; à Monte san Giovanni Campano, Strangolagalli, Filetino et Collepaïdo au N.-W.

Province de Caserte. — Dans cette province (N.-E. de Naples), à *San Giovanni Incarico*, on a eu un moment une petite production pétrolifère (60 t. en 1878), alors que l'Emilie était inexploitée; mais, en 1891, on était tombé à 24 t. et cette production a disparu. La province de Caserte contient, de plus, le long de la rivière Savio (Castro, etc.), quelques gisements asphaltiques qui se continuent vers le Nord.

Hydrocarbures de Sicile. — Enfin la Sicile offre d'assez nombreuses manifestations hydrocarbonurées. Après de Girgenti (Agrigente), il existe des volcans de terre et des suintements pétrolifères. Dans les mines de soufre du centre de l'île, les hydrocarbures ont également joué un rôle réducteur¹. Aux environs de Nicosia (province de Catane), deux sondages faits en 1901-1902 ont été poussés, l'un à 425 m., l'autre à 145 m., et ont amené des traces de pétrole et de gaz. Enfin, dans le Sud-Est de l'île, entre le port de Mazarelli et la ville de Ragusa, on exploite, depuis longtemps, des calcaires asphaltiques miocènes, dont, en raison de leur importance industrielle, nous remettons l'étude au chapitre où il sera question plus spécialement des asphaltes².

6° PÉTROLES DU CAUCASE (KERTCH, MAIKOP, GROSNY, BAKOU, ETC.)

La zone tectonique des Monts Carpathes, qui est pétrolifère sur tout son versant externe en Galicie et en Roumanie, se raccorde, par les Alpes de Transylvanie, suivant une courbe en S, avec les monts Balkans, où jusqu'ici, on n'a jamais trouvé, à notre connaissance, aucune indication pouvant faire soupçonner la présence du pétrole : puis, à travers la mer Noire, elle passe en Crimée et, de là, se prolonge par le Caucase, où les gites pétrolifères sont nombreux, répartis sur les deux versants, et prenant, par endroits, une importance exceptionnelle (fig. 81).

Presqu'île de Kertch et Bardiensk. — Ces gisements commencent dans la presqu'île de *Kertch*, où, depuis longtemps, les suintements pétrolifères, les volcans de boue, les dégagements de gaz, les asphaltes, les sources sulfureuses (probablement dues à une réduction des sulfates par des hydrocarbures) ont attiré l'attention. Bien des fois, et tout récemment encore, on a recommencé là des recherches, rencontrant souvent du pétrole, mais jamais en quantités suffisantes pour motiver une exploitation. Les sondages sont rendus assez difficiles par les éruptions gazeuses, qui devraient être un indice favorable, et par la nature inconsistante du terrain. On a néanmoins poussé jusqu'à 500 m. Mais, sur cette hauteur, on n'a pas recoupé une seule strate dont la nature ait permis

¹ Voir plus haut t. 1, p. 335.

² Voir plus loin t. 1, p. 615.



Fig. 81. — Carte générale des gisements pétroliers au Caucase, d'après Tassart. Echelle au 1/7 500 000.

l'emmagasinement du pétrole en quantité suffisante et, s'il existe un gisement utilisable (ce qui, malgré tout, n'est pas impossible), il y a des chances pour qu'il se trouve seulement à de fortes profondeurs, que l'on n'a pas encore explorées. Le pétrole, que l'on a recueilli vers 400 et 500 m., parfois en quantités notables, était toujours du pétrole très altéré, de densité atteignant 870° et 900°; ce qui paraît impliquer un cheminement prolongé dans des fractures en relation avec la surface, à partir d'un point de départ profond hypothétique. Les terrains superficiels appartiennent au miocène, au pliocène et au pléistocène. On peut remarquer que les petits niveaux pétrolifères recoupés étaient généralement des argiles sableuses, couches hétérogènes par définition même; les bancs de grès trop durs avaient résisté à l'imprégnation.

Sur la rive opposée de la mer d'Azov, près *Berdiansk*, dans le pays des Bulgares, les puits à eau rencontrent également très souvent des gaz inflammables, ou même du naphte. Mais c'est surtout en passant le détroit d'Iénikalé pour aborder la région de Taman, Novorossik, Maïkop, etc., que l'on trouve une zone assez riche en pétrole pour avoir fréquemment, et surtout dans ces derniers temps, attiré les chercheurs.

Groupe de Taman et Maïkop⁴. — Dès les environs de *Taman*, immédiatement après le détroit, on connaît de nombreux volcans de boue, avec des couches chargées de bitume et d'asphalte qui indiquent d'ordinaire la présence du naphte en profondeur. Des sondages, autrefois entrepris dans cette presqu'île, ont rencontré des difficultés pratiques tenant à l'inclinaison des couches et n'ont donné que des résultats insuffisants. Plus loin, vers l'Est, les indices favorables se continuent dans la basse vallée du *Kouban*, dont Pallas signalait, dès 1793, la richesse pétrolifère, puis, sur le bord de la mer Noire, à Anapa, et, dans l'intérieur, sur le versant Nord du Caucase, en un certain nombre de points tels que Tcherkesskoé, Koudako, Ilsky, Maïkop.

À *Anapa*, les forages recoupent, vers 40 m. de profondeur, des argiles noires naphtifères et des couches de sable imprégnées de naphte. À *Koudako*, où l'on a fini par une liquidation, on avait, en 1886, rencontré un jaillissement assez important de pétrole à 865°. Mais c'est surtout à *Ilsky* que la C^{ie} du Standard Russe a fait, à partir de 1880, un effort considérable et infructueux. On a foré alors plus de 200 puits, organisé un pipeline d'Ilsky au port de Novorossisk, etc. En 1887, la production de ce centre a atteint 16.000 t.; mais, finalement, l'entreprise a dû être abandonnée, quoiqu'elle eut abouti à la constatation de trois niveaux pétrolifères sérieux. Le premier de ces niveaux, retrouvé encore en 1893 un peu au Nord d'Ilsky, à *Glinoy Balka*, est formé de pétrole très lourd à 970°, dont on n'a jamais pu tirer une proportion suffisante d'huile lampante malgré des procédés énergiques de traitement, vapeur surchauffée, pul-

⁴ Coll. Ec. d. M., n° 2559. — 1877. COQUAND. (B. S. G. F., 3^e sér., t. 6, p. 86). — 1893. FUCHS et DE LAUNAY, t. 1, p. 109 à 115, et bibl. p. 115. — 1907. YERMOLOFF. *Nouvelles recherches et découvertes de naphte dans le Caucase occidental* (Ann. d. M., déc. 1907; La Nature, n° 1811, 9 fév. 1908 et 27 nov. 1909). — 1908. TASSART. *Expl. du pétrole*, p. 428 à 431, avec carte de la région caucasique, p. 425. — 1910. L. DE LAUNAY. *Rich. min. de l'Asie*, 448. — 1910. DE HAUTPICK. *Maïkop* (Min. Journ., 9 avr., 14 et 28 mai, 2 juil., et 7 déc.).

vérisation, etc., et dont l'état physique, d'autre part, empêchait le transport par pipeline. Deux niveaux inférieurs, traversés à 250 et 370 m., ont donné, comme cela se produit d'ordinaire quand on s'approfondit, un pétrole de densité moindre et de meilleure qualité.

Enfin, la dernière région explorée est à environ 230 km. de Taman, entre *Maikop* et le port de Touapsé, où des sondages en cours donnent de grandes espérances et où l'on projette déjà d'établir un pipeline de 80 km. vers Touapsé, en attendant l'achèvement de la voie transcaucasienne Maikop-Touapsé. Là aussi l'existence du pétrole est manifestée

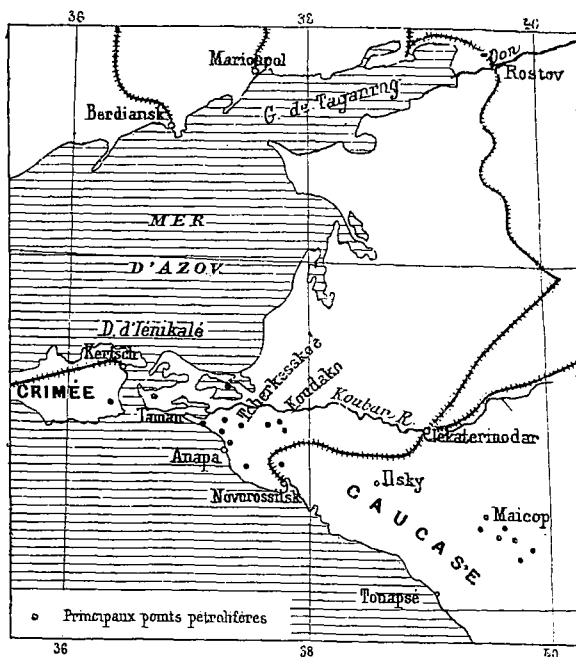


Fig. 82. — Carte des gisements de pétrole de Taman.

par des formes altérées superficielles, un « lac de naphte », une « montagne de cire » imprégnée d'ozocérite et surtout la rencontre, dans les puits de 20 à 25 m. de profondeur, d'une huile très lourde, depuis longtemps employée par les Tcherkesses, puis par les Cosaques pour le graissage. On est, en ce point, sur le versant Nord du Caucase dont les terrains présentent, en moyenne, une pente douce, qui contraste avec les gradins irréguliers du versant Sud. Les terrains, qui avaient été jadis étudiés géologiquement par Coquand, comprennent des couches d'argile sableuse naphlifère séparées par des argiles noires bitumineuses ayant résisté à l'imprégnation. Ce sont les conditions que nous avons déjà rencontrées à Kertch. Jusqu'ici, les difficultés de transport, plus encore que les conditions géologiques, avaient empêché la mise en exploitation. Il semble toutefois que, dans toute cette région Ouest du Caucase, où les signes extérieurs sont partout si encourageants, il ait manqué, en général,

des strates poreuses épaisses et à peu près régulières, susceptibles de permettre l'emmagasinement de quantités notables de naphte. On doit penser, d'autre part, qu'on n'est jamais descendu assez profondément pour échapper aux conditions fâcheuses de la zone superficielle. Cependant, ici encore, on a trouvé, en 1907, à 60 m. de profondeur, une source qui a donné, pendant deux mois, 16 t. par jour, d'un naphte léger à 864°. En août 1909, également à 70 m. de profondeur, à Maikop, un puits jaillissant qui, malheureusement a pris feu presque aussitôt, a débité au moins 60 000 t. de pétrole. A la suite de ce résultat, une campagne de spéculation financière a aussitôt commencé sur ce district. Actuellement on admet que le bassin pétrolifère (encore presque inexploité) peut couvrir 10.000 hectares. La production de 1911 a été de 132 000 t.

En continuant à suivre vers l'Est le flanc Nord du Caucase, on observe, en divers points, des indices hydrocarburés ; mais pour trouver un district vraiment industriel, il faut gagner le bassin de Terek, sur le versant de la Caspienne, où, entre Vladicaucase et Bakou, se trouve, le long de la ligne du chemin de fer, le grand district de *Grosny*.

Grosny¹. — Ce district de Grosny, connu depuis 1823, n'a été mis en valeur que depuis 1890. Cette année-là, un puits, foré à 130 m., a donné, par jour, 1 600 t. de pétrole à 885°. Quelques puits, exécutés ensuite, produisirent des résultats très remarquables : jusqu'à 8 et 10 000 t. par jour pour un puits pendant quelques jours. Dès lors, ce district s'est développé rapidement et sa production depuis l'origine est représentée, en tonnes, par les chiffres suivants :

1892	1894	1895	1896	1897	1898	1899	1900
54.000	84.000	134.000	280.000	450.000	290.00	442.000	503.000
1901	1902	1903	1904	1905	1908	1909	1910
565.000	568.000	532.000	655.000	704.000	833.000	967.500	1.128.700

D'une façon générale, on constate, à Grosny, malgré la richesse de certains puits, divers caractères fâcheux, que nous retrouverons à Bakou et qui tiennent à la constitution même des terrains tertiaires, dans lesquels s'est accumulé le pétrole. Les sondages donnent des résultats très irréguliers dans un même district. Cependant leur production moyenne annuelle a été, en 1909, de 5 740 t. (pour 175 sondes productives), très supérieure à celle de Bakou, où l'on n'a atteint, dans la même année, que 3.830 t.

La zone utilisée forme, à 10 km. Ouest de la ville de Grosny, un anticlinal N. 110° E. composé de schistes argileux jaunâtres, avec lits de marnes dures et bancs de grès d'épaisseur variable, appartenant aux étages oligocène et miocène.

D'après A. Konchin, les suintements naphitifères de Grosny se montrent dans les dépôts paléogènes, que recouvrent les couches stériles néogènes. Ils sont accompagnés par des émanations d'hydrocarbures et des sources minérales sulfureuses chaudes. Le terrain naphitifère, formé de sables,

¹ 1897. A. KONCHIN. (Cong. géol. int. XVIII, sur Grosny). — 1906. K. KALICKY. *Das Naphtagebiet von Grosnyi* (Mem. com. géol. russe. Nouvelle série, vol. 24). — Coll. Ec. d. M., n° 2093.

grès et argiles, est recouvert par des argiles schisteuses foncées néogènes, qui maintiennent le pétrole sous pression: couches parfois enlevées par l'érosion (d'où le jaillissement du pétrole), ailleurs recouvertes par 100 à 300 m. de stérile. Les sondages ont porté sur le versant Nord de l'anticlinal. On cite, pour sa richesse exceptionnelle, la fontaine n° 7, exploitation d'Akhverdov, forée en 1895 à 130 m. de profondeur

Au N.E. de Grosny, on a retrouvé un peu de pétrole à *Bragony*; au S.W., à *Mahomet Yourt*, etc. Mais, pour rencontrer un autre district industriel, il faut gagner les bords de la Caspienne, où une zone d'une richesse classique commence à Berekei, atteint son maximum à Bakou et se continue encore un peu vers le Sud. Nous allons insister tout à l'heure sur cette zone qui, peut-être par une sorte de loi hydrostatique, se trouve précisément au point où la chaîne du Caucase semble mourir dans la Caspienne; mais, auparavant, nous devons mentionner encore les faibles indications pétrolifères que l'on connaît sur le versant Sud du Caucase.

Le fait que le pétrole se trouve ainsi sur les deux versants du Caucase, tandis qu'il est concentré sur un seul versant des Carpathes, est en rapport avec la structure moins dissymétrique de la première chaîne que nous avons précédemment étudiée¹.

Transcaucasie. — Sur le versant Sud du Caucase, il existe d'assez nombreuses indications pétrolifères, qui suffisent à montrer la généralité du phénomène, mais qui, nulle part, n'ont valu la peine d'être exploitées. Nous avons déjà indiqué, en commençant, celles d'Anapa. Il existe aussi de l'asphalte près de *Gagri*. On retrouve du naphte entre Poti et Batoum, à l'embouchure de la Soupsa, à *Gouri*, sur le 42° degré de latitude et de longitude, où des émissions de gaz inflammables, des asphaltes, des suintements d'huile utilisés par les habitants ont donné, en 1896, l'idée de faire des forages. Ceux-ci ont traversé, à 120 m., une couche contenant un peu de pétrole et surtout des gaz; mais on a poussé jusqu'à 350 m. sans rien rencontrer de plus.

En suivant de là, vers l'Est, la longueur de la chaîne, on trouve des indications analogues autour de *Koutais*; puis près de *Kvirita*, dont nous reparlerons à l'occasion du manganèse (pétrole et ozocérite); à *Gori*; ensuite, à 80 km. N.E. de Tiflis, à *Zemachodacheni*, où l'on a foré sans succès en 1902; enfin à *Chatma* (80 km. E. de Tiflis). Là, on a été attiré par de petits volcans de boue et par des puits donnant un peu de pétrole lourd à 900° et l'on a commencé des recherches en 1903. Le cours de la rivière Yora, qui passe à Chatma et se jette dans la Koura, est marqué par diverses attractions analogues.

District de Bakou². — Le district de Bakou a été longtemps le second centre de production pétrolifère dans le monde et mérite donc une étude un peu détaillée, quoique, précisément, sa grande richesse ait contribué à vulgariser ce qui le concerne, en sorte que, pour éviter des répé-

¹ Pages 548 à 560.

² Coll. Ec. d. M., n° 1000, 2391. — FUCHS et DE LAUNAY, p. 94 et bibl. — F. LOEWINSON LESSING. (*Cong. géol.* XXII). Coupe générale du Caucase. — A. KONCHIN (*ibid.* XXIV) *Gisements de naphte de Bakou*. — 1903. BLAZY. *Le pétrole à Bakou et les intérêts français au Caucase* (Dunod, 33 p.). — Cf. Z. f. p. G., 1900, p. 392; 1901, p. 117.

titions oiseuses, nous renverrons à des ouvrages spéciaux qu'il est facile de consulter.

Historique. — L'historique en est particulièrement connu. Chacun a entendu citer ce temple du feu (fermé en 1880 par le gouvernement russe), qui attirait d'innombrables pèlerins à Surakhany. Dès 1713, aussitôt après l'annexion par Pierre le Grand, on commença à exporter le pétrole de Bakou en Russie par la voie de la Volga. Puis, de 1735 à 1806, période où

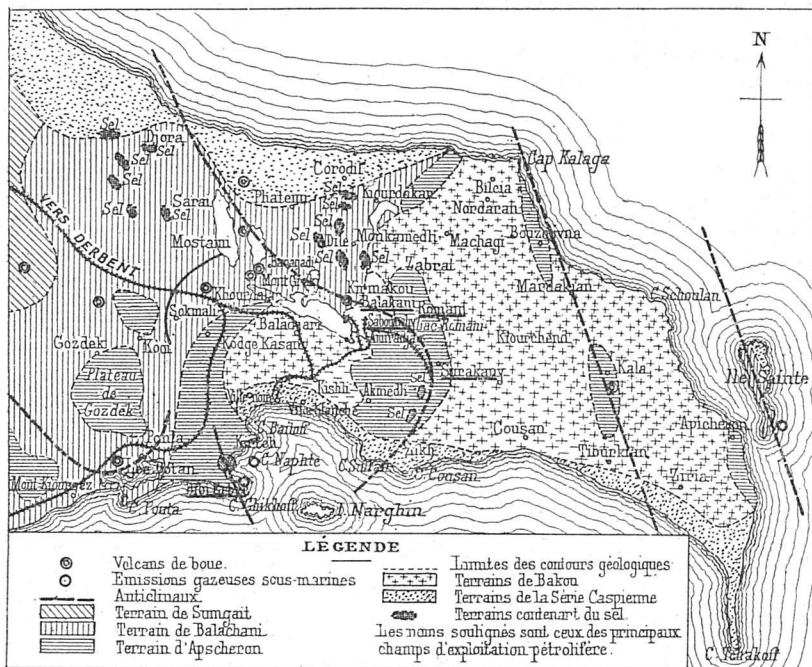


Fig. 83. — Carte des gisements pétrolières de la région de Bakou, d'après Tassart. (Echelle au 1/500 000, 2 mm par kilomètre.)

la région redevint perse, il y eut une interruption. En 1806, un monopole fut établi et dura jusqu'en 1872. Quoiqu'il eût naturellement pour effet de paralyser l'essor industriel, dès 1819, on extrayait 4.000 t. de pétrole par jour. En 1872, le monopole fut enfin aboli. Peu après, en 1875, les frères Nobel y fondaient leur établissement célèbre, organisaient un pipeline vers leur raffinerie, puis, en 1879, construisaient le premier bateau-citerne pour transporter le pétrole sur la Caspienne. Les progrès réalisés depuis cette époque sont résumés dans le tableau suivant, qui donne, d'abord de cinq ans en cinq ans, puis d'année en année, la production, calculée en tonnes, de la presqu'île d'Apcheron (Bakou) :

1865	1870	1875	1880	1885	1890	1895	1900
9.000	23.000	86.000	405.000	1.880.000	3.699.000	6.190.000	9.856.000
1902	1904	1906	1907	1908	1909	1910	1911
10.410.000	10.180.000	8.000.000	7.620.000	8.448.000	7.848.000	7.715.000	6.980.000

La production de 1909 se répartit de la manière suivante : Sabountchy (3.315.072 t.) ; Bibi Eibat (1.964.160 t.) ; Romany (1.402.022 t.) ; Balakhany (1.167.360 t.).

Ces chiffres, évalués en pétrole brut, ne sont pas comparables avec ceux du bassin des Appalaches, où la production d'huile lampante (khérozène) est, en moyenne, presque double (70 p. 100 au lieu de 30 p. 100 pour la même quantité de brut). Ils ont, en outre, subi, dans ces dernières années, l'effet des troubles révolutionnaires qui ont si profondément ébranlé la Russie. Ils montrent cependant assez l'importance pratique de ce grand district et sa décroissance actuelle de plus en plus nette.

Contrairement à ce que pourrait faire croire la vaste dissémination des indices pétrolifères, la région industriellement florissante de Bakou qui, avec Grosny, est la seule vraiment fructueuse sur toute la longueur du Caucase, est, en somme, concentrée dans un espace fort restreint, occupant 10 km² sur la carte, mais seulement exploitée d'une manière intensive sur 700 hectares (fig. 83). Il y a là une remarque générale, qu'il n'est peut-être pas mauvais de répéter à cette occasion avec quelque insistance pour aller au-devant d'illusions trop fréquentes. Sur les quatre grands districts de Bakou, trois, en effet, ceux de Balakhany, Sabountchy et Romany (12 km. Nord de Bakou), sont concentrés, avec Zabrat, dans ce petit espace. Seul, Bibi-Eibat, plus récemment mis en valeur, est situé à 5 km. S.-W., au voisinage de la mer, sous laquelle les affleurements se prolongent d'une façon tellement manifeste qu'on est en train d'assécher une vaste superficie pour y continuer les forages.

Le centre principal est à 76 m. environ d'altitude au-dessus de la Caspienne, soit 50 m. au-dessus de la mer. L'exploitation y a commencé à Balakhany, puis s'est étendue à Romany et Zabrat. A Bibi-Eibat, le premier forage ayant donné un jaillissement important date de 1886.

Conditions d'exploitation. — Les tableaux ci-joints résument les principales conditions d'exploitation et les variations de ces conditions avec le temps :

TABLEAU 24. — NOMBRE DES PUIITS PRODUCTIFS A BAKOU.

	1895	1900	1901	1902	1903	1904	1905	1905 après les troubles.
Balakhany . . .	230	736	775	720	693	732	541	174
Sabountchy. . .	325	665	780	751	747	732	506	167
Romany	62	185	213	219	221	253	187	107
Bibi-Eibat. . . .	31	112	143	135	174	222	189	77

TABLEAU 25. — PRODUCTION MOYENNE PAR PUIITS PRODUCTIF ET PAR JOUR EN TONNES.

	1895	1900	1901	1902	1903	1904
Balakhany	13	7,5	6,8	6,2	5,6	6
Sabountchy.	23,8	16,8	16,8	15,8	13,7	12,2
Romany	80	28,5	25,9	28,4	24	23,4
Bibi-Eibat.	67,5	43	41,5	42	40	36,2

TABLEAU 26. — PRODUCTION MOYENNE DES PUIITS DANS LEUR PREMIÈRE ANNÉE D'EXPLOITATION EN TONNES, PAR PUIITS PRODUCTIF ET PAR JOUR.

1895	1900	1901	1902	1903	1909
57	16,2	21	21	18,5	10,6

TABLEAU 27. — PROFONDEUR MOYENNE DES PUIITS EN MÈTRES A BAKOU.

		1875	1880	1885		
Ensemble du district		60	97	147		
	1895	1900	1901	1902	1903	1904
Balakhany	210	242	248	253	264	264
Sabountchy.	278	313	332	354	360	362
Bibi-Eibat.	313	364	379	425	455	490
Romany	328	410	422	440	450	445

Ces divers tableaux mettent aussitôt en lumière la rapidité extrême avec laquelle s'épuise ce champ pétrolifère. En dix ans, de 1895 en 1904, la profondeur des puits a augmenté, suivant les districts, de 25 à 55 p. 100; le débit moyen s'est réduit à 40 p. 100 environ pour les deux districts les moins profonds, Balakhany et Sabountchy; à 29 p. 100 pour Romany, et à 52 p. 100 pour Bibi-Eibat. En 1909, le nombre total des sondes productives étant de 2.100, la moyenne journalière, considérée comme très favorable, n'a été que de 10,60 t.

Et cette diminution n'est pas un fait passager, accidentel; elle se poursuit depuis les commencements de l'exploitation. Dès 1885, on posait pour règle que chaque production nouvelle de 1.000.000 de t. amenait un approfondissement moyen de 13 m. Ce chiffre est fort exagéré et le paraît d'autant plus que la production se répartit aujourd'hui sur une région plus étendue. Néanmoins, de 1900 à 1904, alors que l'on extrayait, en cinq ans, 51.470.000 t. de pétrole, soit environ 10 millions par an, la profondeur moyenne augmentait de 60 mètres, soit 6 mètres par million de tonnes. En admettant que la loi se poursuive et supposant que la production ne dépasse pas 10 millions de tonnes, on sera, en 1950, à plus de 670 m. Le fait néanmoins n'est pas aussi effrayant qu'on le croirait d'abord pour l'avenir du district puisque, dans beaucoup d'autres régions pétrolifères, l'exploitation courante se fait au-dessous de 1.000 m. et qu'en somme la richesse des puits semble, ici comme partout, tendre plutôt à augmenter qu'à diminuer avec la profondeur.

Cette affirmation semble, il est vrai, tout d'abord, quelque peu paradoxale, étant donné le rapprochement des tableaux précédents qui montrent, avec la profondeur croissante, les rendements moyens par puits et les rendements moyens par première année d'exploitation diminuant peu à peu, en sorte que la diminution peut paraître la conséquence directe de l'approfondissement. De même, la vie des puits tend à se réduire. Mais il ne faut pas s'imaginer que tous les puits nouveaux vont chercher le pétrole à la profondeur maxima atteinte au moment où on les fore. La plupart s'arrêtent, au contraire, en rencontrant le pétrole exploitable dans une couche plus haute, déjà presque totalement épuisée par les forages antérieurs. Par contre, on peut remarquer que les deux districts les plus profonds de beaucoup, ceux de Bibi-Eibat et de Romany, sont, en même temps, ceux où la production moyenne est la plus élevée, jusqu'à cinq et six fois les chiffres comparables de Balakhany. Et, si cela tient en partie à ce que ces districts sont plus jeunes et moins épuisés, cela peut aussi résulter de ce qu'ils vont chercher le naphthé à une plus grande profon-

deur : les couches plus profondes ayant été, au moment de leur remplis-

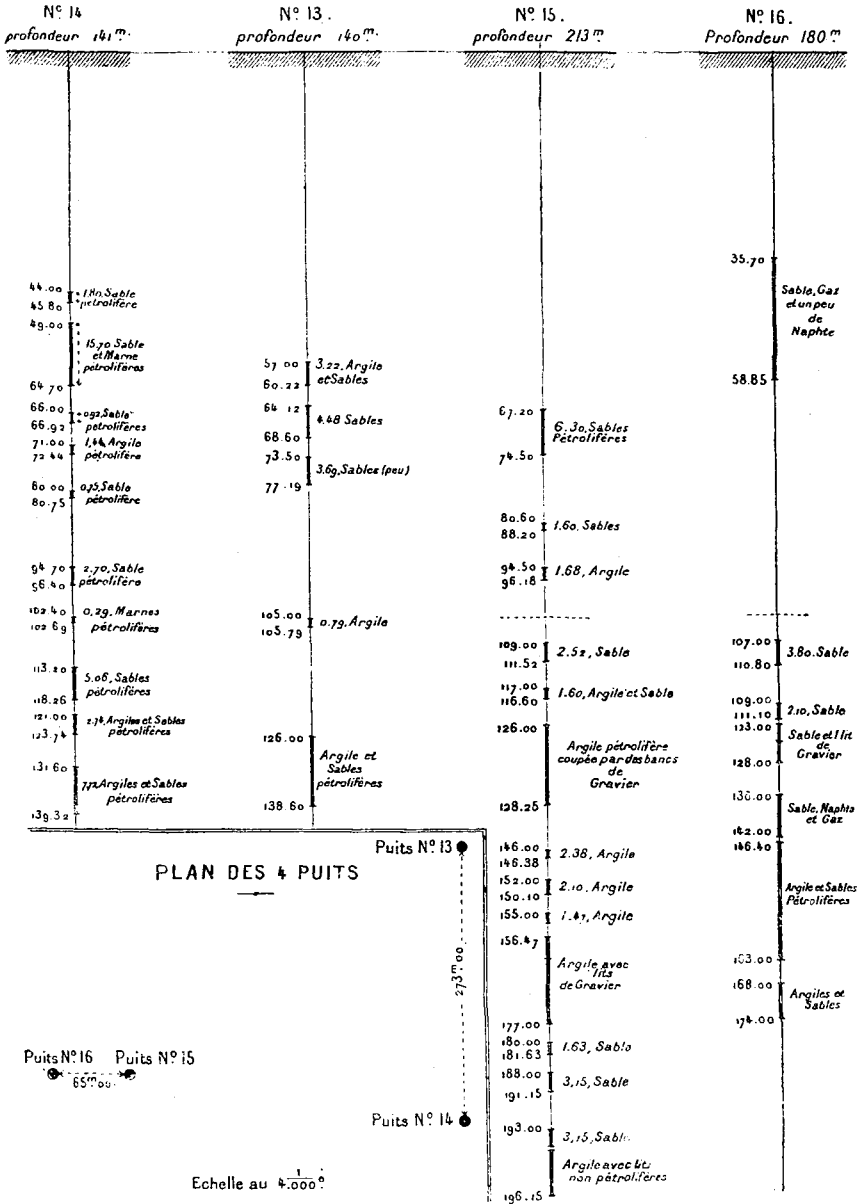


Fig. 84. — Coupes et plan de 4 puits appartenant à la Société Commerciale et Industrielle de Naphte, Caspienne et mer Noire, à Balakhany.

sage, plus voisines de l'origine même du pétrole et, en même temps, ayant probablement subi un moindre drainage ultérieur, une moindre perte vers

la surface pendant les longues périodes écoulées depuis le dépôt du pétrole dans ses premiers réservoirs souterrains.

Quant à la diminution du rendement par puits, on a fait observer que, tout en étant rapide, elle l'était cependant moins que l'augmentation du nombre des puits dans chaque région, de sorte que, le nombre des puits décuplant, le rendement moyen par puits a, par exemple, en douze ans, baissé de moitié à Bibi-Eibat, mais que, finalement, on a extrait au total cinq fois plus.

D'autre part, quelques districts nouveaux entrent maintenant en jeu. Ainsi l'île de Tchéléken a produit, en 1911, 246.000 t. et Surakhany 328.000 t.

Les terrains de Bakou, dont nous donnerons tout à l'heure la description géologique, présentent, pour l'industrie spéciale du pétrole, des caractères que l'on peut résumer en deux mots. Ils sont extrêmement irréguliers et hétérogènes, passant constamment, par variations latérales, de l'argile au sable plus ou moins agglutiné ou même au gravier, en sorte que les conditions favorables à l'emmagasinement du pétrole se modifient elles-mêmes à chaque pas. En outre, leurs dislocations sont telles que, jusqu'ici, on n'a jamais pu faire aucune coordination sérieuse des résultats obtenus. Contrairement à ce qui se passe en Pennsylvanie, où l'on a eu le type le plus parfait de couches poreuses régulières à production constante, à Bakou, les résultats obtenus dans des puits immédiatement contigus varient sans cesse, comme le montre notre figure 84, et un puits stérile peut fort bien être encadré de puits très riches, ou, inversement, une fontaine jaillissante d'une richesse exceptionnelle se rencontrer à la fin dans un terrain déjà perforé inutilement de puits stériles ou pauvres. C'est l'équivalent de ce qui se passe pour les circulations d'eau profonde, dans le cas si ordinaire où les soi-disant nappes, dont parlaient les anciennes descriptions, n'existent pas et sont remplacées par un réseau complexe de filets-souterrains, que l'on peut ou non rencontrer à des profondeurs variables.

Dans ces conditions, on ne saurait guère parler de « niveaux pétrolières » un peu généraux comme on le fait couramment ailleurs. Suivant les points, on rencontre du naphte à peu près à toutes les profondeurs.

Ce sont surtout les conditions physiques des terrains qui déterminent l'accumulation du pétrole ou la stérilité des couches. Ainsi les argiles compactes sont d'ordinaire stériles, à moins qu'elles ne soient fissiles et ne renferment de l'huile dans leurs fissures, ou encore qu'elles ne deviennent sableuses : ce qui entraîne la localisation du pétrole dans des sortes de niveaux maintenus par les schistes. Les sables les plus favorables sont ceux qui présentent un grain moyen, ils peuvent alors arriver à en renfermer 25 à 50 p. 100. Si le sable est fin et tassé, les vides se réduisent et la teneur n'est plus que de 10 à 20 p. 100. Enfin, les grès compacts et durs, agglutinés par un ciment calcaire, n'en renferment guère plus de 3 p. 100.

L'irrégularité des couches de Bakou est, sans doute, une des causes pour lesquelles on rencontre, par endroits, des poches d'une richesse extraordinaire, où semble s'être accumulé le pétrole qui n'a pu trouver place dans les terrains avoisinants. Le fait est à rapprocher de celui que présentent les médiocres asphaltes de Pont-du-Château, en Auvergne,

où l'on voit des ruisseaux de bitume suinter dans certaines galeries, comparés avec les asphaltes régulièrement imprégnés de Seyssel (Ain), où l'hydro-carbure s'est réparti de tous côtés dans le calcaire sans présenter ces accumulations exceptionnelles¹. Mais la richesse étonnante de certaines fontaines jaillissantes à Bakou tient, en outre, à la grande proportion de gaz, qui s'est amassée en profondeur avec le pétrole dans quelques vides souterrains et qui détermine une brusque expansion lorsque le forage vient à crever l'un de ceux-ci. Cette richesse en gaz est en rapport bien probable avec l'âge des pétroles de Bakou et avec leur composition chimique connexe dont nous allons reparler. Il semble que ces pétroles récents, ayant été par suite moins métamorphisés, aient perdu une moindre proportion de leurs matières volatiles.

Cette abondance des gaz est, pour le dire en passant, une des raisons qui contribuent à l'épuisement rapide des niveaux pétrolifères de Bakou. En effet, le pétrole s'élançait au jour avec violence et souvent même si brusquement qu'on en perd une grande partie. Le réservoir souterrain dont il provient — réservoir qui, il faut bien le remarquer, est limité et ne se renouvelle pas — doit forcément s'épuiser plus vite. Et, en outre, chaque sondage nouveau, créant une issue aux gaz, diminue leur pression souterraine : par conséquent, les chances de jaillissement dans les puits nouveaux.

Voici, à côté des rendements moyens donnés plus haut, quelques exemples célèbres de ces fontaines exceptionnelles. On a vu, à Bibi-Eibat, un jaillissement donner environ 80 000 t. de pétrole, qui furent entièrement perdues dans la mer. En 1902, un puits de Romany donna 164 000 t. en dix jours. En 1904, un puits de la propriété Tumaief, qui avait été exploité depuis longtemps et qui donnait 32 t. par jour, a brusquement produit 10 000 t. par jour pendant trois jours, puis est retombé à 320 t. Divers puits ont donné 1 000 à 2 000 t. pendant quatre ou cinq jours, pour s'arrêter ensuite et parfois reprendre leur jaillissement quand une nouvelle accumulation de gaz avait eu le temps de se former. Très souvent, à Bakou, les puits commencent par être jaillissants, puis nécessitent un pompage. Cependant, nous venons de voir un cas où un puits ancien a eu tout à coup un jaillissement remarquable.

Composition chimique. — Chimiquement, le pétrole du Caucase présente, comme nous l'avons dit², avec celui de Pennsylvanie, une différence si sensible qu'on a quelquefois voulu y voir la preuve d'une origine différente : celui du Caucase étant alors supposé éruptif, tandis que le pétrole de Pennsylvanie serait organique. En deux mots et sans insister, nous rappelons que les pétroles pennsylvaniens sont de formule générale C^nH^{2n+2} (groupe du méthane), ne contenant qu'accessoirement les carbures moins saturés, C^nH^{2n} et C^nH^{2n-2} , tandis que les pétroles de Bakou sont, en moyenne, des carbures non saturés, alicycliques, homologues supérieurs de l'éthylène, C^nH^{2n} , ou même de l'acétylène, C^nH^{2n-2} , mais contenant accessoirement des corps de la série du méthane. Les carbures alicycliques et aromatiques sont, d'ailleurs, représentés dans les deux cas.

¹ Voir plus loin, pages 610 à 614.

² Page 471.

On n'a pas pu, jusqu'ici, reproduire la série de l'éthylène, caractéristique de Bakou, en parlant de tissus organisés, tandis que l'opération réussit très bien pour les pétroles saturés homologues du méthane, C^nH^{2n+2} , dominant en Pennsylvanie. Par contre, la synthèse des types éthylène et acétylène a été réalisée par voie minérale. Mais, outre que l'on trouve, en réalité, tous les carbures dans les deux cas, la distinction même sur laquelle on s'est fondé nous paraît sans fondement chimique et il est infiniment probable, à notre avis, que la synthèse des deux séries se réalisera un jour ou l'autre, par la voie organique comme par la voie minérale : la différence entre ces deux catégories étant de celles que la chimie élimine peu à peu. Ce n'est pas, croyons-nous, par la chimie que l'on résoudra jamais cette question géologique si délicate.

Si l'on envisage, au contraire, les faits géologiquement, on peut remarquer que les pétroles de Pennsylvanie ont des chances pour être infiniment plus anciens que ceux du Caucase, ayant eu sans doute une formation en rapport avec les mouvements hercyniens qui les ont produits ou accumulés dans tous les terrains antérieurs à la fin du carbonifère. Ceux de Bakou doivent, au contraire, probablement s'être formés à la suite des mouvements tertiaires.

D'autre part, les pétroles de Bakou sont, par rapport à ceux de Pennsylvanie, relativement superficiels. Métamorphisme et altération de surface ont pu jouer, dans la composition actuelle, un rôle qui serait à préciser. Il est possible aussi que la température de distillation n'ait pas été primitivement la même. Plus cette température est haute, plus, on le sait, les carbures sont pauvres en hydrogène.

Dans la composition du pétrole de Bakou, il y a encore un autre trait caractéristique dont j'ai déjà dit un mot. Tandis que l'huile brute du bassin pennsylvanien a pour densité 780 à 790 dans les districts de Pennsylvanie et de la Virginie, les pétroles de Bakou sont ordinairement compris entre les limites suivantes : Balakhany et Sabountchy, 863-872 ; Bibi-Eibat, 825, et sont, par conséquent, beaucoup plus denses. On remarquera que le pétrole de Bibi-Eibat, le plus léger de la région, vient, en moyenne, de 490 m., contre 260 et 360 m. dans les deux autres districts. Or, la diminution de la densité avec l'approfondissement, dans un district déterminé, est un fait très général. Et, sans vouloir, bien entendu, supposer que tous les pétroles ont commencé par être identiques entre eux, on peut attribuer un grand rôle, dans la production des huiles plus lourdes, à l'altération superficielle. En composition élémentaire, le pétrole de Bakou contiendra, par exemple, 86,6 de carbone contre 82 à 84 dans l'Ouest américain et la différence se traduit, d'autre part, par une diminution de l'oxygène à Bakou, l'hydrogène étant à peu près en qualités égales.

Géologie. — Géologiquement, le substratum de la presqu'île d'Apchéron est formé par des terrains éocènes, obligocènes et miocènes ayant subi des plissements qui donnent des anticlinaux dirigés environ N.W., c'est-à-dire tout à fait obliquement sur l'allongement de la pointe et sur la direction orographique du Caucase, mais avec des incurvations très accentuées.

L'un deux passe à Bibi-Eibat, l'autre à Balakhany et Sabountchy (fig. 85). Des volcans de boue semblent assez souvent en jalonneur la crête.

Ces terrains sont recouverts des deux côtés de la pointe, au Nord et au Sud, par des calcaires coquilliers blancs, que l'on considère comme un type pléistocène des dépôts formés dans la dépression aralo-caspienne et qui présentent, eux aussi, une pente à 30 degrés près de Romany¹. Comme dans toutes les régions pétrolifères, on observe, au voisinage du pétrole, d'assez nombreux dépôts de sel et des sources salées, sans pourtant qu'il se présente des masses volumineuses de cette substance. L'existence du gypse est de même manifestée par l'abondance des sources sulfureuses et des émanations d'hydrogène sulfuré, parfois même des incrustations de soufre natif. L'âge du pétrole est impossible à déterminer. On n'en trouve pas dans les couches aralo-caspiennes, peut-être simplement parce qu'elles sont calcaires. En revanche, les terrains sous-jacents peuvent tous en renfermer. L'abondance la plus grande est dans l'oligocène. Malgré l'irrégularité, dont nous avons déjà parlé, on a cru pouvoir tracer localement 8 horizons à Romany et 5 à Bibi-Eibat. C'est ce que figure notre coupe (fig. 85). Par un préjugé dont nous aurons l'occasion de reparler à propos des pétroles indous, on s'est imaginé



Fig. 85. — Coupe des terrains pétrolifères de la presqu'île d'Aphéron dans la direction Balakhany-Zabrat. Le sommet de l'anticlinal correspond à Balakhany.

longtemps qu'il n'y avait pas de pétrole au-dessous d'une certaine nappe aquifère. On s'est aperçu plus tard qu'il n'y a aucune relation nécessaire et théorique entre le pétrole et l'eau, situés dans des strates indépendantes séparées par une couche imperméable, et que, pour retrouver du pétrole, il suffit de traverser la couche aquifère, en ayant soin d'établir un serrement pour éviter d'introduire l'eau dans les couches pétrolifères inférieures, où elle exercerait une action refoulante sur le pétrole.

Caspienne (Tchélekén. etc.). — La région pétrolifère, dont le centre principal est à Bakou, s'étend dans tous les sens bien au delà de la zone où sont aujourd'hui concentrées les exploitations industrielles. Au Sud de Bibi-Eibat, on voit partout des taches noires de bitume ou d'asphalte, des efflorescences salines ou même des volcans de boue. Ce régime se continue à Aliate, où la ligne de Tiflis tourne vers l'Ouest, puis sur les deux bords de la Koura et dans tout le pays désolé qui s'étend vers l'Elbourz. Les conditions économiques et politiques du pays ont, jusqu'ici, empêché les recherches dans ce sens ; le gouvernement préférant ne pas laisser se disperser les efforts. Vers le Nord, on retrouve des indications analogues jusqu'à Berekei. Enfin, la zone pétrolifère traverse la Caspienne. Près de l'île Sainte, on prétend que des barques sont parfois renversées par des

¹ On sait que dans la zone de la mer Noire, on a de nombreux exemples de vallées submergées, ou, au contraire, de terrains lacustres contemporains de l'Elephas primigenius, relevés de 100 mètres.

émanations gazeuses violentes. Au-dessous de Bibi-Eibat, les Iles Boueuses sont formées par des émissions de boue et de gaz. Le Naphta-Bank, que marquent les cartes à 30 km. Est de la pointe Apchéron, est connu également pour ses émissions sous-marines. Enfin, après une interruption, on retrouve le pétrole dès qu'on atteint la rive Est de la Caspienne à l'île *Tchéléken*. Les couches très disloquées qui forment cette île présentent, dès la surface, de l'huile lourde, du pétrole, de l'ozocérite. Ce district s'est notablement développé depuis peu. En 1910, on a obtenu, dans un sondage, 3600 t. en 24 heures. En 1911, on a atteint au total 246 000 t. 100 km. plus à l'Est, à *Nephtianaya*, au Sud de la ligne transcaspicienne, de Krasnovodsk à Merv, on a fait un commencement d'exploitation à un endroit signalé par de nombreux volcans de boue. Le pétrole a été signalé jusqu'à Merv, sur le prolongement direct de la zone caucasienne. On retrouve, d'autre part, comme nous allons le voir, le pétrole plus au Nord, dans la province de Ferghana qui forme l'extrémité du territoire russe au Nord du Pamir.

7° PÉTROLES DU TURKESTAN RUSSE, DE L'ASIE MINEURE, DE LA PERSE

Turkestan russe (Ferghana)¹. — Les recherches pour pétrole de cette région ont été surtout faites un peu au Sud de *Margellan* (station de chemin de fer intermédiaire entre Kokand et Andidjan) et suivant une ligne E.W. allant de là, par Tchinion, passer au Sud de Kokand. Dans le groupe de Tchinion, on a poussé des sondages jusqu'à 300 m. Un peu plus au Nord, à *Maili-Sai* (district de Namangan), un puits foré à 210 m. par le gouvernement a donné, en 1903, une importante venue de pétrole. Les niveaux pétrolifères reconnus appartiennent au crétacé supérieur, nettement plissé. Ils ont partout donné, jusqu'ici, l'impression d'être disséminés sans véritable concentration industrielle.

Asie Mineure et Arabie. — En Asie Mineure, on peut signaler, comme indices de dégagements hydrocarbonés, quelques points où se dégagent des vapeurs brûlantes.

Il est difficile de dire s'il s'agit d'un phénomène semblable en *Troade*, à Bergas (Assos)², où, au milieu d'un massif trachytique, les pierres sont, d'après la tradition, assez chaudes pour consumer aussitôt les cadavres qu'on y ensevelit. Il ne s'agit là peut-être que d'une simple activité hydrothermale, manifestée dans la même région par les sources bouillantes chlorurées sodiques de Touzla. Mais c'est à peu près certainement le cas pour les fameux feux naturels de la *Chimère*, sur la côte de Lycie, qui jaillissent d'un massif de serpentine³.

En Arabie, le *Bahr el Sufi*, dont les abîmes et les sables fluides ont donné lieu à toutes sortes de légendes, présente des sources de pétrole.

¹ 1902. *Les sources de pétrole de l'Asie centrale* (Bull. Ann. Min., janv. 1902, p. 614). cf. Z. f. pr. G., 1899, p. 304. — 1903. LEVAT. (Ann. d. M., mars, p. 303 à 317).

² Peterm. Mitth., 1862, p. 238.

³ ТЧИНАТЧЕФФ (*loc. cit.*, t. 1, p. 424 à 431).

Kurdistan, Mésopotamie et Perse¹. — Nous abordons maintenant une zone plus méridionale que la précédente et située sur une autre traînée de plis tertiaires. Partant de l'Arménie, elle suit la côte méridionale de la Perse; nous la retrouverons plus tard dans l'Inde. avec les deux groupes pétrolifères du Punjab et de la Birmanie supérieure et son prolongement passe par Sumatra et Java.

Une première région, d'environ 700 km. de long, où le pétrole est connu depuis longtemps sans avoir encore nulle part donné lieu à une véritable exploitation industrielle, suit, parallèlement à la vallée du Tigre, les chaînes du *Kurdistan* avec une direction générale N.W.-S.E. On la signale successivement en Turquie, à Kerkouk, Tous-Chourmati, Kifri, puis en Perse, dans le Kirmanchah (Ouest de Zohab), à Mendeli en Turquie, enfin en Perse, à Schuster, au S.E. des ruines de Suse, à Ram-Ormuz.

En commençant par l'Arménie, on peut rappeler que, dans une des salles intérieures du rocher de Van, il suinte, d'après Loftus, une fontaine de bitume².

Sur le bas Euphrate, *Hit* produit de l'asphalte.

À l'Est du Tigre, à *Kerkouk* (200 km. Nord de Bagdad), on recueille depuis longtemps du naphthe, qui est expédié à Bagdad et dans toute la Mésopotamie orientale. Cette région de Kerkouk contient, en même temps, des gisements d'albâtre et de sel : c'est-à-dire l'association des substances produites par l'évaporation que l'on retrouve souvent réunies avec des hydrocarbures, en Sicile, à Volterra, etc.

Parmi les affleurements de Mésopotamie, on cite ceux de la région de Zohab dans le pays de *Kirmanchah* (Ardelan) comme ayant une importance particulière. On a là, à l'Ouest des roches éruptives de Hamadan, des plissements affectant le secondaire et le tertiaire. Sur un anticlinal qui longe la rivière Tchan-i-Tchiasorkh, au pied du Kou-i-Ahengheran, le pétrole, avec eau salée et veines d'ozocérite, se trouve dans des terrains sableux recouverts par des marnes, et les indigènes l'utilisent.

À *Schuster* et *Ram Ormuz*, il existe également des puits indigènes. Trois sondes forées depuis peu à Schuster donnent une petite production. Puis, le long du golfe Persique, la zone pétrolifère se poursuit. On la connaît à 80 km. d'Abouchehr, à *Daliki*, où les natifs recueillent du pétrole lampant en abondance, mais où un essai de sondage n'a pu être poursuivi en raison de la chaleur excessive du climat³.

Les terrains traversés jusqu'à 189 m. contenaient du pétrole et du gypse. Au détroit même d'Ormuz, à Shanawallah, près de Bender-Abbas, on retrouve du pétrole et des sources sulfureuses, ainsi que dans l'île voisine de Tavilah (ou Kichim), dans laquelle le pétrole accompagne une source chaude sulfurée traversant le muschelkalk et en relation avec des couches de gypse.

¹ Pour le pétrole en Perse, on peut voir : Z. f. pr G., 1900, p. 163; 1901, p. 160; 1902, p. 68. — 1892. DE MORGAN. *Sur les gîtes de naphthe de Kend-e-Chirin* (gouvern. de Ser-i-Poul), Perse (Ann. d. M., 9^e, t. I, p. 227). — Cf. TASSART (*loc. cit.*, p. 438).

² LOFTUS. *Turko-persian frontier*.

³ WINKHLNER. (Oester. Zeitschr.).

Puis vient une longue interruption tenant sans doute, en grande partie, au peu de connaissances que nous avons encore sur le littoral de la Perse, et l'on arrive à la région pétrolifère mieux connue du Belouchistan oriental, du Punjab et de l'Afghanistan.

8° PÉTROLES DES INDES ANGLAISES (ASSAM ET BIRMANIE)

Allure générale. — Les gisements de pétrole indous sont en relation très nette avec les plissements tertiaires, comme, plus à l'Est, ceux de Sumatra, Java, Bornéo et du Japon qui vont être étudiés, comme aussi ceux de la Galicie, de la Roumanie et du Caucase : le tout formant, sur la carte, une série de traînées reliées les unes aux autres par des conditions tectoniques analogues. Dans tout le massif ancien de la péninsule indoue à terrains secondaires et tertiaires horizontaux, il n'en existe, au contraire, pas une trace. Les deux grands champs pétrolifères de l'Inde sont aux deux extrémités de l'Himalaya : l'un dans le Punjab sans importance ; l'autre dans l'Assam et la Birmanie.

Production. — Si la production de l'Assam est restreinte, celle du pétrole birman a pris, depuis quelques années, un essor notable, presque comparable à celui des gisements situés un peu plus loin sur la même zone, dans les Indes hollandaises, à Sumatra et à Java, que nous examinerons plus loin. Actuellement, dans la production mondiale, l'Inde vient après les Etats-Unis, la Russie, les Indes hollandaises, la Galicie et la Roumanie. Aux Indes, on produisait seulement 587 000 tonnes en 1907. On est monté à 1 017 000 en 1908.

La production de l'Inde, presque totalement fournie par la Birmanie, s'est décomposée, dans ces dernières années, de la manière suivante :

	1904	1905
Akyab.	141 t.	159 t.
Kyaukpkyu	267	180
Yenang-young. Magwe	219 000	256 800
Singu. Myingyan.	71 900	112 500
Yenang-yat. Pakokku	56 700	56 100
Total de la Haute Birmanie.	348 008	425 739
Assam et Est du Bengale.	9 750	11 190
Punjab	5	5

Assam. — A l'extrémité Est de l'arc himalayen, on trouve, à partir de l'Assam, puis dans la Haute-Birmanie, une longue zone pétrolifère. Si l'on se reporte à notre figure 86, on voit que les points où le pétrole est connu apparaissent là de divers côtés, depuis le coude du Brahmapoutra, près de Digboi et Makum, au Nord, puis le long des affleurements plissés du tertiaire, dans la vallée de l'Iraouaddy, où sont les districts les plus productifs (Yenang-young, Singu, etc.), et, à l'Ouest, dans

⁴ Pour la bibl. générale des pétroles indous, voir : L. DE LAUNAY. *Rich. min. de l'Asie*, p. 465. — 1898. NOETLING. *The occurrence of Petroleum in Burma* (Mem. India, t. 27, part. 2, p. 35). — 1905. HOLLAND. *Mineral production* (Rec. G. S. India, t. 32, p. 69 à 77, cf. *ibid.*, t. 34, p. 58 et 59). — 1908. TASSART. *Exploitation du pétrole*, p. 440 à 469.

les îles de la côte d'Arakan, où l'attention a été attirée vers les recherches de pétrole par la présence de volcans de boue.

Ces divers gisements se répartissent suivant deux zones principales sur les deux flancs de la zone anticlinale marquée par les monts Arakan : d'un côté, gîtes de l'Assam et des îles Arakan; de l'autre, vallée de l'Iraouaddy, en Birmanie.

Dans l'Assam, le pétrole est associé avec des sources salées et des jets de gaz naturels sur un anticlinal de tertiaire supérieur qui se poursuit vers Cachar. A l'Est, une autre zone parallèle des mêmes terrains suit la vallée de l'Iraouaddy.

Le pétrole de l'Assam a été signalé dès 1825. Mais c'est en 1865 seulement, que Medlicott a attiré plus sérieusement l'attention sur sa présence à Makum.

Un premier sondage de 40 m. fut fait en 1867. Mais les travaux sérieux n'ont été commencés qu'en 1899 par l'Assam Oil Cy, qui a installé une raffinerie à Digboi et qui a accru peu à peu sa production, jusqu'en 1903. Depuis lors, celle-ci reste stationnaire, et le district n'a pas paru, dans ces derniers temps, susceptible d'un grand avenir.

La production de l'Assam a été, en 1905, de 11 190 t.

A Makum, le pétrole se trouve sur l'un des flancs d'un anticlinal éocène, dans l'axe duquel apparaît localement le crétacé. L'huile est de densité assez forte. A Digboi, le pétrole est dans le miocène. Au Sud, les indications pétrolifères se prolongent vers Cachar.

Îles de la côte d'Arakan. — Les îles dites Arakan sont situées sur la côte entre les parallèles 18°20 et 20°10. Les formations pétrolifères commencent, au Sud d'Akyab, par les îles Baranga. Puis vient Ramri, seul point où l'on ait fait, jusqu'ici, un rudiment d'exploitation industrielle, et Cheduba (Tchedouba).

Dans toute cette région, les volcans de boue sont abondants. Leurs éruptions s'accompagnent parfois de flammes intermittentes, dues à une inflammation spontanée des gaz hydrocarbonés, qui contribuent à en rendre les manifestations impressionnantes. Les suintements abondants de pétrole ont amené, depuis fort longtemps, les indigènes à creuser de petits puits d'une vingtaine de mètres, qui produisent chacun 20 à 30 litres par jour. Au moins une centaine de ces puits existent simultanément. Les tentatives pour créer une industrie d'après ces indications encourageantes ont été, jusqu'ici, tout à fait insignifiantes et suivies de peu d'effet. On n'a guère travaillé un peu qu'à *Ramri* et sur la côte avoisinante, où, de 1898 à 1903, on a extrait 500 à 600 t. par an, sans tendance à l'augmentation.

Géologiquement, cette traînée des îles Arakan forme, à l'Ouest des monts du même nom, le prolongement tectonique de la zone de l'Assam. Toutes ces îles sont formées de schistes et de grès tertiaires, alternant avec des nodules ou même des lentilles calcaires assez étendues. Les grès, moyennement fins, sont souvent assez durs. Des couches de lignite sont fréquemment intercalées dans la série.

Les localités pétrolifères sont : les trois îles Baranga; puis, à Ramri, Tsi-Chang, Likmau, Minbain, Kangautau, Ryauk-Galé, Létaung; dans

l'île Chéduba, l'Ouest de Kanthao Roa, Kama, Kaindi Roa; enfin, l'île Ronde et l'île Plate, qui sont immédiatement au S.E. de Chéduba¹.

Vallée de l'Iraouaddy. — Le pétrole de la vallée de l'Iraouaddy est

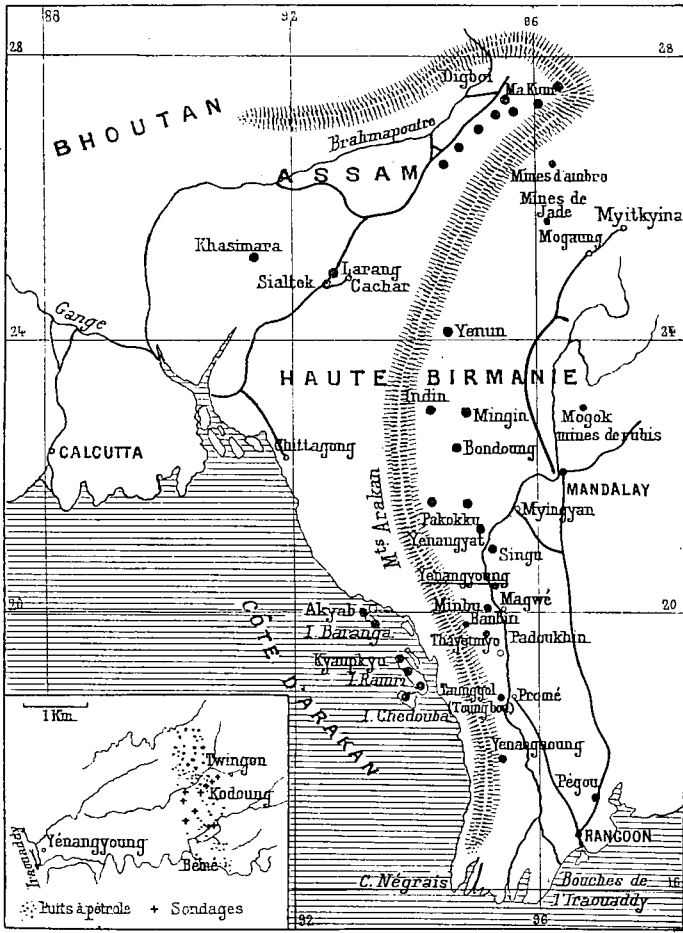


Fig. 86. — Carte des gites de pétrole de la Birmanie. (Echelle au 1/8 500 000^e.) Le carton représente les puits à pétrole de la région de Yenang-young.

connu des indigènes depuis un siècle et demi. Dès 1755, des rapports anglais signalaient les rudiments d'exploitation de Yenang-Young. En 1797, un autre rapport mentionne plus de 700 puits, dont quelques-uns atteignant 67 m. Cette exploitation, très importante par conséquent et pour laquelle on a donné un moment des chiffres de production allant à 90 000 t., s'est continuée, par des moyens primitifs, jusqu'en

¹ Voir une carte dans TASSART, *loc. cit.*, p. 442.

1887, où fut introduit le procédé de forage. Des sociétés européennes s'établirent et, après beaucoup de déboires, finirent par réussir. La production de ce groupe de Yenang-Young Singu, etc., qui était tombée à 4450 t. en 1886, avant ces travaux, est montée à près de 400 000 dès 1906 et fournit, à elle seule, les 5/6 de la production indoue. En Birmanie, il existe encore un autre centre d'une certaine importance à Yenang-Yat, qui a produit 75 000 t. en 1903. Ce champ de Yenang-Yat a été entamé vers 1864. Les autres affleurements pétrolifères nombreux, que signale notre carte et dont nous donnerons un aperçu résumé, ne produisent à peu près rien. Ici, comme dans toutes les zones pétrolifères, une grande dispersion apparente des manifestations hydrocarburées aboutit, en pratique et industriellement, à une localisation très étroite, puisque le centre de Yenang-Young, qui, au total, a 2 km. de long sur 1 km. de large, se compose de trois champs de 40, 80 et 180 hectares, et que la distance des deux centres principaux, Yenang-Young et Yenang-Yat, ne dépasse guère, au total, une cinquantaine de kilomètres.

Géographiquement, du Nord au Sud, on commence à trouver le pétrole à Yenun, vers le 24° degré. Puis viennent Indin, Mingin, Bondoung, encore au N.W. de Mandalay. Mais la véritable richesse pétrolifère commence seulement vers 21°30' à Yenang-Yat; elle s'accroît à Yenang-Young, 50 km. plus au Sud (20°29', 94°56') et recommence ensuite à décroître dans les autres districts de Mambu, Banbin, Padomkbin, Toungbou ou Taoungol.

Outre la remarque précédente relative à la localisation du pétrole fructueusement exploitable sur moins de 50 km. de long, dans une zone pétrolifère qui s'étend, au total, sur près de 1 000 km., on peut remarquer la position de tous ces champs sur la vallée de l'Iraouaddy. Sans doute, cela tient d'abord à ce que cette vallée a suivi, dans son ensemble, la direction tectonique d'un ancien synclinal miocène, le long duquel affleurent les couches pétrolifères. Mais, si les gisements riches se trouvent de préférence en des points bas, il y a certainement là un effet du jeu des pressions, analogue à celui qui amène la localisation des sources thermales à la rencontre des lignes de fracture, par lesquelles remontent les eaux, avec des dépressions topographiques, rivages, pieds de falaises ou montagnes, et vallées. C'est une autre application du principe qui semble, comme nous l'avons vu, provoquer le développement spécial des centres pétrolifères aux extrémités des chaînes, là où elles se rapprochent de la mer, ou, du moins, de la plaine. A ce propos, on peut remarquer que, précisément en Birmanie, à Yenang-Young, le Dr Noelling a, par une série d'observations attentives, constaté un rapport entre le rendement des puits pétrolifères aux différentes époques de l'année et le niveau des eaux du fleuve au voisinage, par une influence de la charge aquifère variable sur les pressions pétrolifères profondes. C'est une application directe et fort curieuse du principe des pressions hydrostatiques réciproques, employé, depuis les travaux de François, au captage des sources thermales¹, et qui montre bien le rapprochement entre les deux ordres de phénomènes, malgré la différence essentielle qui les

¹ Voir L. DE LAUNAY. *Traité des Sources Thermo-minérales*, p. 516.

sépare en pratique : à savoir le non-renouvellement des nappes pétrolifères à la suite de leur épuisement. Nous avons vu, d'ailleurs¹, toute l'importance industrielle de « serrer » les eaux souterraines rencontrées par un forage avant d'arriver au pétrole, c'est-à-dire d'empêcher ces eaux de pénétrer, par le trou de sonde, jusqu'au pétrole et de le refouler latéralement. En général, cette pression locale de l'eau est nuisible et écarte le pétrole du sondage. Il arrive pourtant, exceptionnellement, qu'une nappe plus générale d'eau, superposée à une nappe pétrolifère, la comprime dans tout son ensemble et exerce ainsi une influence favorable, comme les lits imperméables, sous lesquels on rencontre d'ordinaire les enrichissements. On a trouvé à Yenang-Young du pétrole immédiatement recouvert par de l'eau; et le même fait, contraire à certaines règles trop simplistes des pétroliers, a été constaté également à Bakou².

Géologiquement, tous ces gisements, répartis sur 650 km. de long dans la vallée de l'Iraouaddy, semblent avoir pour origine les mêmes terrains miocènes inférieurs; l'accumulation du pétrole à certains niveaux étant, comme partout, connexe de la nature physique des terrains alternants. On distingue deux anticlinaux principaux à suintements hydrocarbonés : celui de Yenang-Yat et Yenang-Young et celui de Mimbu³.

Yenang-Yat. — Yenang-Yat ou Yenang-chit, quelquefois aussi nommé Pagan (21°6', 94°15'), comporte une série d'anticlinaux parallèles, recoupant obliquement le fleuve. Les terrains, que nous allons avoir l'occasion d'étudier plus en détail à Yenang-Young, où ils se montrent analogues, sont composés de pliocène gréseux, de miocène supérieur sous la forme d'argiles à gypse et de miocène inférieur, comprenant des grès pétrolifères alternant avec des argiles. Le terrain étant très variable d'un point à l'autre, les lentilles gréseuses qui se sont prêtées à l'imprégnation pétrolifère ont une longueur restreinte et un régime inconstant. C'est pourquoi les descriptions ne signalent pas moins de quinze couches pétrolifères ayant des épaisseurs variables, qui partent de zéro pour atteindre 12 à 15 m.

En résumé, on a là un anticlinal dissymétrique, dont l'axe est dirigé N.S. et dont le flanc Est est plus redressé que le flanc Ouest. Le pétrole se rencontre de préférence vers le sommet des anticlinaux, mais pourtant souvent avec une richesse spéciale à une centaine de mètres sur leur flanc Est.

Le terrain pétrolifère semble être originellement ici le miocène, dont les affleurements ont été souvent signalés par des dégagements de gaz combustibles. On a même cru observer des indices problématiques de volcans de boue remontant à cette époque.

La densité de l'huile est de 820 à 830.

Yenang-Young. — A Yenang-Young, la série géologique comprend : au sommet, 1400 m. de pliocène (grès jaunes et conglomérats ferrugi-

¹ Page 476.

² TASSART, *loc. cit.*, p. 453.

³ Voir dans les *Richesses minérales de l'Asie*, une carte p. 468.

neux); puis 300 m. de miocène supérieur (étage de Pégu) formé d'argiles brunes à gypse et de grès. C'est dans des argiles et grès analogues du miocène inférieur (étage de Promé) que se présente le pétrole. Actuellement, on le trouve toujours dans les grès et jamais dans les argiles. Ces grès pétrolifères, verdâtres quand la cassure est fraîche, brunissent rapidement à l'air. On a, par une systématisation discutable, admis l'existence de six niveaux superposés, dont le quatrième est le plus riche et donne le meilleur pétrole de densité 877 à 892, vers une profondeur de 70 m. Les pétroles supérieurs sont plus lourds comme toujours et ont été à peu près épuisés. Les deux niveaux inférieurs sont mal reconnus. Il est à remarquer que jamais deux sondages voisins ne donnent la même coupe. Ici, comme à Bakou, c'est par un abus des mots que l'on parle de niveaux continus analogues à ceux de Pennsylvanie. Le quatrième niveau pétrolifère est typique à cet égard, puisqu'on est obligé de lui attribuer une épaisseur de 6 à 90 m.

Le pétrole, dans chaque couche, tend toujours à s'élever vers la partie supérieure. Il est irrégulièrement mélangé avec les niveaux aquifères. Ainsi un puits donnera, de haut en bas, 18 m de sable aquifère, 30 m. de sable pétrolifère et encore 1,50 m. de sable aquifère. Sur un autre : on traversera 7,60 m. d'argile bleue, 23,80 m. de sable aquifère, 54,50 m. de sable brun, 15 m. de sable pétrolifère, encore 4,50 m. d'argile. Dans le voisin, sous l'argile supérieure, on n'aura que 10,60 m. de sable aquifère et 35 m. de sable pétrolifère immédiatement au-dessous. La stratigraphie est donc très irrégulière, ce qui est le défaut ordinaire des champs pétrolifères tertiaires (de beaucoup les plus nombreux dans le monde). Il est à remarquer que le terrain a subi des fissures intérieures pouvant intéresser un ou plusieurs bancs, dans lesquelles on observe parfois des recristallisations de gypse, et, ailleurs, des remises en mouvement de pétrole, où l'on a cru voir la preuve de volcans de boue contemporains du dépôt¹.

Dans l'ensemble, les couches forment un dôme allongé, à axe plat avec flancs inclinés de 35 à 40°. Une carte du D^r Noetling semble mettre en évidence une zone riche centrale assez étroite avec appauvrissement latéral.

Il y a trois champs principaux; formant une zone N.S. à l'Est de Yenang-Young : Bémé, au Sud (40 hectares), où se trouvaient autrefois les principaux puits indigènes; puis Kodoung (60 hectares), où l'on n'a travaillé que depuis 1887; enfin, à 1 km. Nord de Bémé, Twingoung, autre ancien district dont la superficie est de 180 hectares.

Mimbu. — Ce gisement (20°10', 94°56') est sur la rive droite de l'Iraouaddy, à 685 km. de Rangoon. On y trouve des volcans de boue bien connus qui semblent, comme dans les cas précédents, en relation avec un pli anticlinal, dans lequel le miocène apparaît par endroits, surmonté de grès et de conglomérats pliocènes pouvant atteindre 1500 m. de puissance. Le flanc Est de l'anticlinal principal est très abrupt et même

¹ NOETLING (*loc. cit.*, 1898) a consacré, aux volcans de boue de Birmanie, une étude spéciale.

renversé par endroits; le flanc Ouest est, au contraire, en pente douce. Le gisement n'a encore aucune importance industrielle; mais les manifestations pétrolifères y sont abondantes. On retrouve, pour l'activité des volcans de boue, qui sont de simples dégagements de gaz hydrocarbonés, une intervention des pressions hydrostatiques analogue à celle que nous avons signalée précédemment d'une façon générale. Les « éruptions » coïncident avec les fortes crues du fleuve, qui ont évidemment pour effet de refouler les gaz et d'en augmenter l'état de tension : ce qui détermine finalement la projection d'eau entraînant, à l'état de boue, l'argile miocène.

Banbin, Promé, etc. — Une série d'autres localités pétrolifères, plus méridionales que Mimbu, sont énumérées dans le travail de Théobald, telles que Banbin (Pan-pyen), Padouk-hin, Toungboji, Promé, etc. Aucune n'a d'importance pratique.

9° PÉTROLES DES ILES DE LA SONDE¹

Généralités. — Les gisements pétrolifères présentent, dans les îles de la Sonde, un développement qui, en ces dernières années, a donné lieu à des exploitations de plus en plus fructueuses. C'est, entre tous les gisements minéraux des Indes hollandaises, ceux qui ont donné les meilleurs résultats, quoiqu'au début des premières exploitations de Sumatra, en 1890, la confiance des chercheurs eux-mêmes fût très restreinte. L'essor date surtout de 1901.

Tandis qu'autrefois les Américains avaient le monopole du marché dans l'Insulinde, sauf quelques importations russes, aujourd'hui les pétroles de Sumatra, de Java et de Bornéo, fournis notamment par les grandes compagnies dites Compagnie Royale (Sumatra) et Compagnie Dordtsche (Java), ont réussi à refouler les Américains, et la production de 2 000 000 de t. par an dans l'Insulinde dépasse celle de la Roumanie. En Asie, la production japonaise de 276 000 t. lui est bien inférieure et, complètement absorbée par la consommation locale, ne saurait lui faire concurrence.

La Compagnie Royale surtout qui, manquant de débouchés à Sumatra, a dû s'agrandir pour l'exportation, a créé des installations dans les grands ports d'Asie et même importé de la benzine en Europe et aux États-Unis. On a également commencé à vendre du mazout comme combustible pour les navires d'Asie.

A première vue, on est tenté d'établir un lien d'origine entre cette abondance spéciale des manifestations hydrocarbonées et la multiplicité des phénomènes volcaniques qui ont, suivant les mêmes zones, une activité si fameuse. Mais nous avons déjà fait remarquer que ce rappro-

¹ 1897. DE STOPPELAAR. *De Petroleum industrie in het bijzonder die van Nederlandsch Oost-Indie*, Amsterdam. 225 p. — 1904. G. BOCSQUET. *Les Richesses minérales des Indes orientales néerlandaises* (Bul. Soc. Ing. Civils). — 1908. TASSART. *Expl. du pétrole*, p. 469 à 488. — 1911. CLÉMENT. *Le pétrole aux Indes néerlandaises* (Ann. des M., 10^e, t. 17, p. 386 à 434, avec carte).

chement, rencontré aussi dans d'autres régions du globe, doit être plus apparent que réel : le lien, qui paraît d'abord rattacher le pétrole au volcanisme le reliant beaucoup plus tôt, quand il est d'âge tertiaire, à certaines zones faibles plissées à cette époque tertiaire, qui se sont trouvées particulièrement disposées à former récemment encore des zones de fracture, sur lesquelles se sont concentrées, pour la même cause et non par une solidarité directe, les dislocations suivies d'épanchements volcaniques.

On en a un commencement de preuve quand, regardant de plus près la position des affleurements pétrolifères, on les voit se continuer, par

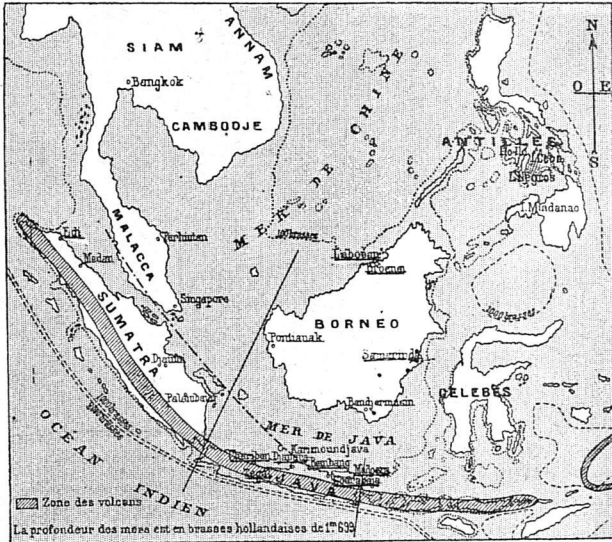


Fig. 87. — Gites pétrolifères des îles de la Sonde.

exemple, le long des zones plissées japonaises, jusqu'à Sakhaline, où il n'y a aucun indice volcanique.

On peut également remarquer qu'il n'existe point de rapport entre l'activité volcanique locale de telle ou telle région particulière et sa richesse en pétrole. Ainsi, Java, où les volcans se suivent presque sans interruption, n'a que des venues pétrolifères médiocres à côté de celles de Sumatra, où le caractère éruptif est beaucoup moins accentué ; et, dans cette deuxième île même, la zone pétrolifère est située très sensiblement au Nord de la zone volcanique, sur une traînée indépendante.

Les principaux affleurements des îles de la Sonde forment, le long de Sumatra et de Java, une première suite que l'on peut rattacher à celle de la Birmanie et de la vallée de l'Iraouaddy, étudiée précédemment (fig. 87). On connaît, en outre, des affleurements de moindre importance à Bornéo, Timor, dans les Philippines. Puis on en retrouve à Formose et au Japon.

A Sumatra, les deux champs pétrolifères principaux sont : l'un au Nord

vers Edi et Médan ; l'autre, le principal, au Sud, à Palembang. Puis vient Java, avec des manifestations hydrocarburées assez nombreuses, mais sans grand développement, qui sont, de l'Ouest à l'Est, celles de Cheribon, Tegal, Djapara, Rembang, Soerabaya, Madoera. A Bornéo, on signale principalement : Samarinda sur la côte Est ; Laboean et Broenai sur la côte N.W.

Industriellement, la production de ces trois îles a suivi la progression suivante (en tonnes de pétrole brut) :

TABLEAU 28. — PRODUCTION PÉTROLIFÈRE DES ÎLES DE LA SONDE.

	Sumatra.	Java.	Bornéo.	Total.
1890	»	»	»	1 600
1895	96 000	38 000	»	134 000
1900	284 000	78 000	64 000	426 000
1904	690 000	102 000	230 000	1 022 000
1908	889 000	125 000	430 000	1 444 000
1909	»	»	»	1 420 000
1910	»	»	»	1 450 000

Le progrès a donc été extrêmement rapide vers 1904. Depuis 1907, malgré des découvertes récentes, on est resté presque stationnaire.

Sumatra. Groupe du Nord-Ouest. — Au N.W. de Sumatra, les exploitations de pétrole se trouvent dans la résidence d'Atjeh, entre la pointe Diamant, ou Edi, et Médan, vers 5° de latitude N. Dans cette région, les exsudations de pétrole sur le rivage avaient, depuis longtemps, attiré l'attention. On commença, en 1900, par forer trois puits de 100 à 130 m. près d'Edi, vers la rivière Perlak, et l'on obtint du pétrole jaillissant. Au milieu de 1901, les trois puits donnaient 5.000 barils par jour.

Au Sud de Perlak, les principaux champs explorés ont été ceux de Lang-sar, Bésitang, Babalan, Langkat. A Babalan, on eut un moment du pétrole jaillissant, trouvé à 672 m. de profondeur ; mais les résultats furent, en somme, défavorables. A Langkat (district de Deli), de premiers forages, datant de 1885 et repris en 1889, ont amené, en 1890, la constitution d'une grande société, la « Koninklyke Nederlandsche Maatschapy tot Exploitatie van Petroleumbronnen in Nederlandsch-Indie », dite plus brièvement « Compagnie Royale néerlandaise », qui, après diverses tentatives et de premiers succès suivis d'un épuisement assez prompt à Tegala Baroé, a constitué, en 1898, le champ de Perlak, signalé plus haut, en le reliant par un pipeline de 150 km. aux raffineries de Bésitang et Pankalang Mandan ; après quoi, elle a porté son effort principal dans le champ du S.E., Palembang, dont nous allons parler. En 1901 et 1902, cette société a foré par an, dans Sumatra, 15 à 16 km. de sondages, dont au moins moitié à Palembang.

En 1908, la production de la Royale et de ses filiales à Sumatra, Java et Bornéo a été de 1 444 000 t. Elle vient ainsi immédiatement après la Standard américaine.

Sumatra. Groupe du Sud-Est (Palembang). — Diverses recherches ont été faites, dans cette région, depuis 1895 : d'abord, par la Compagnie d'exploration Nederlandsche Indische qui, en 1900, a cédé ses droits à la Compagnie Royale, puis par la Compagnie de Sumatra-Palembang qui a créé le champ de Melamoen ; enfin par la Société Mœara Enim depuis 1896, et par quelques autres.

A Melamoen, on a trouvé, en 1900 et 1901, le pétrole productif vers 300 m. de profondeur, à peu près dans un puits sur deux. Mais, par un accident avec lequel il faut compter dans cette région, les puits furent bientôt bouchés à la suite d'un tremblement de terre et il fallut les approfondir.

La Compagnie Mœara Enim a commencé par trouver le pétrole entre 70 et 190 m. de 1897 à 1899. En 1900, il fallut atteindre 300 m. ; en 1901, 350 m. Il semble y avoir là trois horizons pétrolifères à 80, 200 et 350 m. de profondeur. En 1903, il existait 55 puits à Campong Minjak, vers le point où la rivière Enim se jette dans la rivière Lemalang, et 14 à Minjak Stam, un peu plus à l'Ouest. Quelques-uns ont donné jusqu'à 500 t. par jour. Mais les puits de cette région semblent s'épuiser fort rapidement.

Un autre champ de la même région est celui de Babat, où l'on a trouvé, outre le pétrole, de l'ozocérite. La Compagnie Moesi Ilir, absorbée plus tard par la Royale, a travaillé de ce côté.

Par suite de tous ces travaux, la résidence de Palembang est devenue aujourd'hui un grand centre de production pétrolifère, avec plusieurs lignes de pipelines, de 150, 170 km., etc., reliant aux raffineries.

Les conditions géologiques, dans lesquelles se trouve le pétrole à Sumatra, sont les suivantes. Au Nord de l'alignement volcanique qui forme la crête Sud de cette île et à une distance de cet axe volcanique qui peut être en moyenne de 100 à 150 km.¹, se trouvent des terrains tertiaires plissés, notamment de l'éocène, de l'oligocène et du miocène, au milieu desquels se sont intercalées des intrusions de gabbro, puis du pliocène. Cet ensemble faiblement plissé, qui constitue la grande plaine à l'Est de Sumatra, forme le prolongement tectonique du synclinal miocène pétrolifère, marqué par la vallée de l'Iraouaddy.

Les gisements riches forment trois niveaux principaux dans le pliocène. Le miocène est également un peu pétrolifère. Les puits les plus productifs se trouvent, suivant la loi générale, sur des zones anticlinales.

Le pétrole de Mœara Enim a pour poids spécifique 0,79 et donne à la distillation : 10 p. 100 de benzine légère, 32 de benzine lourde, 46 de kérosène, 12 de résidus. Il est, par suite, assez inférieur au pétrole pennsylvanien.

Java. — A Java, diverses recherches pétrolifères ont été effectuées depuis 1886. Elles ont abouti à un résultat puisque l'on a produit, en 1904, 102 000 t. de pétrole brut dans cette île ; en 1907, 125 000 t. C'est

¹ On sait que Sumatra, après s'être séparé de Java par une dislocation récente, tend à se morceler à son tour par des cassures N.S. Ces dislocations n'ont pas plus de rapport avec le pétrole que les axes volcaniques.

néanmoins un faible résultat pour un grand pays, où l'on avait cru d'abord constater la présence du pétrole en une foule de points.

Les régions productives sont, comme celles de Sumatra, situées à l'intérieur de la grande courbe éruptive qui, ici, occupe à peu près toute l'île : c'est-à-dire au Nord de celle-ci. Les centres principaux se trouvent dans les deux résidences de Soerabaya et de Semarang, vers le centre de l'île, entre les 110 et 113 degrés. C'est vers *Soerabaya* que furent faites les premières recherches. Des sondages, poussés jusqu'à 260 m., ont donné en moyenne un puits productif sur deux. Les premiers puits forés, sans avoir une production bien forte, se sont montrés très constants ; il semble que les résultats ont été inférieurs quand, plus tard, on est descendu plus profondément. On a travaillé, dans cette région, à Djabacota, Lemongan, Kadewan, Tjermé, dans l'île de Madura, etc.

Dans la résidence de *Semarang*, on cite les deux districts de Panolan et Ledock. A Panolan, un puits a donné 80 t. (640 barils par jour). A Ledok, cinq puits, forés en 1895, ont donné une production journalière totale de 120 t. en pétrole jaillissant.

La principale compagnie travaillant à Java est la Compagnie Dordtsche qui, en 1887, a commencé à Soerabaya et qui, après diverses reconstitutions, a organisé plusieurs raffineries. Cette compagnie trouve, à Java même, un débouché pour son huile, bien que celle-ci soit d'une qualité inférieure à celle de Sumatra. En 1908, elle a produit 71 000 t. de pétrole raffiné et 3 500 t. de paraffine.

Géologiquement, toutes les indications pétrolifères de Java se rencontrent dans le miocène, sur une zone générale E. W. qui coupe la protubérance par laquelle s'élargit si sensiblement la partie centrale de l'île Java. On a cherché, sans la trouver, une relation de ce pétrole avec l'activité éruptive qui existe au Sud, sur une longueur de 4500 km. équivalente à la largeur de l'Europe, presque sans interruption, avec 121 cratères dans Java seul. Cette relation, nous l'avons dit, ne paraît pas exister. Le pétrole, s'il n'a pas une origine plus profonde, crélacée, est en rapport avec le miocène, dont l'extension est très considérable à Java (plus du tiers de la superficie totale) et dont l'épaisseur peut atteindre 6 km. Il s'est fait pendant cette période tertiaire, ici comme dans toutes les îles de la Sonde, des intrusions considérables de gabbros ; et, si l'on voulait chercher un rapport entre le pétrole et les manifestations internes, ce serait dans le rapprochement avec ces gabbros, non dans un lien avec l'activité éruptive actuelle, qu'on aurait chance de le trouver. Ce miocène, presque horizontal sur le rivage Nord de Java, prend des plissements de plus en plus accentués à mesure qu'on se rapproche du centre de l'île.

On peut seulement remarquer, d'après Verbeek, l'existence, dans la région pétrolifère, de nombreuses sources salées chaudes, contenant souvent de l'iode et dégageant parfois du pétrole ou des gaz combustibles. C'est une application de plus de la relation bien connue entre le sel et le pétrole, qui se retrouve dans tous les pays du monde et qui peut s'expliquer aussi bien par une relation de produits d'évaporation lagunaire que par une association de fumerolles. Le tout fait penser aux nombreux gisements gypseux du Sud de la France, de l'Algérie, etc., situés sur

des pointements d'ophite correspondant à des anticlinaux triasiques et sur lesquels se trouvent parfois des hydrocarbures. On ne signale cependant, à Java, que fort peu de gypse. La chaleur de ces sources est facilement explicable dans une île où le degré géothermique doit être remarquablement faible.

Bornéo¹. — Dans l'île de Bornéo, le pétrole a été signalé en divers points : toujours, comme il était aisé de le prévoir, sur les chaînes de plissement tertiaires. Après diverses tentatives, on est arrivé au chiffre de 230 000 t. en 1904, 326 000 t. en 1906, 430 000 t. en 1908. Le centre principal est celui de *Samarinda* sur la côte Est; accessoirement, on a travaillé aussi à *Laboean*, sur la côte Nord-Ouest, dans la partie anglaise. Ainsi qu'il arrive dans tant d'autres régions pétrolifères et par un fait qui ne doit pas être purement accidentel, on observe donc ici encore une certaine relation de la richesse pétrolifère avec la disposition topographique : les points bas, ou de moindre pression, semblant se présenter dans des conditions plus favorables, comme si la pression interne, qui a déterminé l'ascension du pétrole, avait trouvé là une résistance moindre pour arriver jusqu'au jour.

A *Samarinda* travaille la Compagnie Samuel en Nederlandsch Indische Industrie en Handels Maatschapy, dont les concessions couvrent 200 000 hectares. Les premiers sondages faits par elle, en 1896, près la baie de Balik Papan, ont donné, à 60 m., du pétrole de densité très forte, dépassant parfois 980. Environ 50 puits sont descendus là jusqu'à des profondeurs de 200 à 420 m., et les plus profonds ont fini par obtenir du pétrole à 860°. Tout le long de la rivière Sanga Sanga, où les exsudations avaient attiré l'attention, on a également foré jusqu'à 300 m., en rencontrant du pétrole de densité décroissante à mesure qu'on s'enfonçait. De 960° et plus on est arrivé ainsi à 860°. Plus de 100 forages ont été exécutés, les plus profonds allant jusqu'à 500 m. Presque tous ont été jaillissants, et leur production a varié de 5 à 70 t. par jour.

Le pétrole moyen de cette région a un poids spécifique élevé de 0,87 à 0,97 (contre 0,83 à 0,87 à Bakou, 0,80 en Pennsylvanie). Il est donc défectueux et donne, en moyenne, en produits marchands : 10 à 12 p. 100 de benzine à 0,768; 3/4 de kérosène, 15 d'huile pour paraffine (Wax-résidu) et 39 de résidus (liquid fuel).

Les recherches de la région de *Laboean* ont eu des résultats très faibles.

Timor. — Timor, qui présente, avec Sumatra et Java, des analogies tectoniques bien marquées, renferme des traces de pétrole à *Pualaka*, sur la rivière Mota Mutike, royaume de Laclubar. Des asphaltes, schistes bitumineux et émanations de gaz inflammables ont conduit à effectuer un forage, qui a rencontré un peu de pétrole.

Iles Philippines. — Le pétrole est un peu exploité dans l'île de *Mindanao*, aux environs de Chatabatto. On en retrouve, avec plus d'abondance, dans l'île de *Cebu*, sur la côte Ouest, aux environs de Toledo. Dans l'île de *Panay*, province de Ilo-Ilo, on en a également signalé, ainsi que dans celle de *Leyle*.

¹ Pour la géologie, voir *Rich. min. de l'Asie*. Pages 338, 342 et 479.

Formose. — Des indications pétrolifères ont été depuis longtemps signalées dans cette île à Fainan¹.

10° PÉTROLES DU JAPON²

Historique et statistique. — L'extraction du pétrole au Japon n'a commencé que depuis 1890 à prendre quelque importance et n'est devenue réellement florissante que depuis la guerre russo-japonaise : celle-ci ayant eu pour conséquence l'établissement, en 1904, d'un impôt qui constitue, pour l'industrie locale, un véritable droit protecteur. On a extrait : en 1908 : 2 953 800 hectolitres ou 276 000 t., valant 16 626 000 fr. ; en 1910, environ 258 000 t.³

Les principales sociétés qui s'occupent de l'industrie du pétrole au Japon sont la Holden Oil C^y, la Japon Oil C^y, l'International Oil C^y (cette dernière filiale de la Standard Oil C^y des États-Unis).

Sur la production japonaise, 98 p. 100 viennent, dans la grande île (côte Ouest), de la province d'*Echigo*, en face l'île de Sado, vers 37°,30 et, principalement, des champs pétrolifères d'Higashiyama, Nishiyama, Niitsu; puis, à titre accessoire d'Amaze (sur la côte même) et de Kubiki. Mais il existe, en outre, de nombreuses indications pétrolifères sur la longueur des côtes du Japon, notamment à Sugayama, côte Est, vers le 136° méridien, et, tout récemment encore, on a fait des recherches à Hokkaido, où on a creusé, depuis longtemps, des puits à la main le long du détroit de la Pérouse.

Historiquement, on rapporte que le premier puits à pétrole aurait été foré en 615, dans la province d'Echigo (aujourd'hui encore la plus productive), où une autre tentative aurait été faite en 1613, avec une première installation de distillation. Mais le développement réel a commencé, comme pour toute l'industrie minière japonaise, vers 1886 à 1890 et s'est traduit d'abord par l'introduction des procédés de sondage américains à Amaze.

A *Amaze*, le premier puits fut foré en 1873. En 1888, on obtint de meilleurs résultats en se plaçant sur la côte même. A partir de 1890, on introduisit le système américain, et la production atteignit un moment 50 000 hectolitres en 1894 pour redescendre assez vite au tiers.

Les autres champs pétrolifères productifs de la grande île sont : dans la province de Shinano, au S. W. d'Echigo, celui de Mure; dans celle d'Ugo, plus au Nord, vers 39°,30, Akita; dans celle de Mutzu, Tsugaru; dans celle de Fotoni, Sagara.

¹ Sur les indications de pétrole en Chine, voir : 1902. Z. f. pr. G., p. 41.

² 1900. *Les mines du Japon* (Expos. Univ. de Paris, p. 492 à 512). — 1901. SHIN-ICHI TAKANO. *La const. chimique du pétrole japonais* (Congrès du pétrole à Paris) (Chem. u. Techn. Zt.). — 1902. КОЧИВЕ. *Geol. and topogr. maps of the Oil fields of Japan* (Tokyo). — 1902. *Outlines of the geology of Japan* (Geol. Surv.). — 1905. *Le pétrole au Japon* (la Nature, n° 1664, 15 avril). — 1908. TASSART. *Exploitation du pétrole*, p. 488 à 493. — 1909. *Mining in Japan. Past and present* (Publ. du Bureau de mines, 322 p.).

³ Les évaluations sont faites en Kokus. Le Koku équivaut à 1,13 baril américain (baril compté à 129 kg.); il représente environ un fût à pétrole en bois français et peut être estimé à 145 ou 150 kg.

Géologie. — Géologiquement, le pétrole du groupe d'*Amaze* (Echigo) se trouve dans les terrains tertiaires supérieurs formés de grès bruns tendres à gros grains de quartz, qui deviennent bleus quand on les a lavés à l'essence pour enlever leur pétrole, et, accessoirement, dans des schistes ou tufs accompagnant ces grès. On a cru remarquer que le pétrole des schistes et des tufs avait une densité inférieure à celui des sables et grès. La loi anticlinale a été généralement vérifiée, comme aux Indes hollandaises. Les anticlinaux pétrolifères ont des longueurs de 15 km. au plus et, plus souvent, de 3 à 6 km., avec des pentes très abruptes. La profondeur des sondages atteint fréquemment 750 à 900 m. par suite de la forte inclinaison des couches, bien qu'ailleurs on trouve le pétrole entre 150 et 300 m.

La production de la plupart des puits ne dépasse pas 1,70 barils, quoiqu'on ait rencontré des puits jaillissants exceptionnels allant à 110 barils. Leurs existence est souvent très courte et l'on a cru remarquer que ceux où l'on recueille une huile légère ont une durée plus courte.

La qualité de l'huile est moyenne. Le pétrole d'*Amaze* varie de 820 à 920 comme densité et donne, en moyenne, à la distillation :

Benzine 150° C.	22 p. 100
Huile lampante 150 à 300.	50 —
Huile lourde	20 —
Résidu et pertes.	8 —

A *Nagamine*, au N. E. d'*Amaze*, dans la montagne, de bons résultats ont été obtenus en 1898 dans des terrains analogues à ceux d'*Amaze*.

A *Ohira* (département de Niigata), toujours dans la même région, le terrain consiste en strates tertiaires et en tuf andésitique. Les couches à huiles sont des sables surmontés par des argiles.

A *Hiré* (même département de Niigata), où l'on a obtenu des succès depuis 1895, le terrain consiste en alternances de schistes gris et de grès tendres d'âge tertiaire : le pétrole étant dans les grès.

Enfin, sur la côte S. E., à *Sugayama*, le pétrole se trouve également dans des grès tertiaires alternant avec des schistes argileux.

IV. — OZOCÉRITE

Composition, propriétés et usages. — L'ozocérite, qu'on appelle aussi ozokérite, erdwachs ou paraffine naturelle, est un pétrole solide d'un vert plus ou moins brunâtre, jaune de miel ou rouge hyacinthe par transmission, tendre et flexible, se pétrissant entre les doigts lorsqu'on l'échauffe un peu, dégageant une odeur aromatique et présentant une cassure conchoïdale ¹.

Sa densité est de 0,950, sa composition élémentaire comprend 85,75 de

¹ Il résulte d'un travail de P. GAUBERT sur les cristaux mous (Bul. Soc. Min., 1910, t. 33, p. 339), que l'ozocérite (C_nH_{2n+2}) est, en réalité, cristallisée et forme un intermédiaire entre les cristaux durs et les cristaux liquides.

carbone et 15,15 d'hydrogène. L'absence d'oxygène la distingue aussitôt du bitume.

Elle contient de 32 à 50 p. 100 de paraffine et est surtout employée pour sa préparation ainsi que pour celle d'un hydrocarbure blanc appelé *cérésine*, pouvant remplacer la cire d'abeilles dans toutes ses applications. On consomme une certaine proportion d'ozocérite pour remplacer la gutta-percha comme isolant électrique, pour fournir aux abeilles des ruches artificielles, pour faire des enduits, etc.

La *paraffine* elle-même, dont nous dirons quelques mots à cette occasion, est un corps blanc cireux et cristallin qu'on peut extraire également des pétroles, des goudrons de bois et de houille, des lignites¹, de la tourbe, etc... Suivant son origine, elle présente des points de fusion variant de 43° à 80° et au delà ; elle bout vers 300°. L'alcool concentré et bouillant la dissout aisément pour l'abandonner par refroidissement sous forme de belles aiguilles blanches, solubles dans l'éther. On l'utilise, au lieu de cire, pour la fabrication des cierges, etc...

Le *traitement de l'ozocérite* consiste, en général, à la fondre dans une chaudière par un courant de vapeur, puis à la distiller, d'abord à la vapeur, ensuite par un chauffage à feu nu. La matière distillée est coulée en pains qu'on comprime à la presse hydraulique pour les débarrasser de leur excès d'huile. Enfin on blanchit la cire en fondant et brassant de l'acide sulfurique ; celui-ci va au fond en entraînant la matière colorante.

Un autre procédé, dit procédé Reddl, consiste à blanchir en fondant avec trois parties de noir animal, puis dissolvant la cire avec du sulfure de carbone ou de la benzine.

Gisements divers. — Les *gisements* d'ozocérite ayant une valeur industrielle sont assez rares. Le premier qui ait été connu est celui de *Slanic* en Roumanie, au pied des Carpathes, indiqué en 1835 par le docteur Mayer. Depuis, on en a retrouvé en divers points de la Galicie, principalement à *Boryslaw*, où l'exploitation de l'ozocérite a été le point de départ d'une grande exploitation pétrolifère², et au voisinage, à *Truskawice*, *Starunia*, *Dwiniacz*. Il en existe également à *Gresten* près Gaming, en Autriche, près de *Libisch* en Moravie, à *Urpeth* en Angleterre, en divers points du Caucase, dans l'île *Tchéléken*, sur la mer Caspienne, dans l'*Utah* en Amérique, etc.

En Galicie, l'industrie de l'ozocérite, organisée seulement en 1860, était représentée, il y a quelques années, par les chiffres suivants de production annuelle :

Boryslaw.	10 000 tonnes à 500 francs	=	5 000 000
Starunia.	3 000 — à —	=	1 500 000
Dwiniacz.	1 800 — à —	=	900 000
Truskawice.	1 200 — à —	=	600 000
			8 000 000

Nous nous bornerons à décrire comme types les gisements de Boryslaw et de Tchéléken.

¹ Voir plus haut, p. 468, les lignites de Weissenfels en Saxe.

² Voir plus haut page 556.

Gisement de Boryslaw (Galicie)¹. — L'ozocérite est, dans la formation pétrolifère des Carpathes décrite plus haut², un cas particulier intéressant.

A *Boryslaw*, elle forme, à travers un terrain composé de schistes et de grès miocènes, une série de véritables filons allant de quelques millimètres à plusieurs mètres d'épaisseur. Son origine adventive n'a donc jamais été douteuse. A mesure que l'on s'est enfoncé, on a eu la preuve de plus en plus nette que sa présence était due à la remise en mouvement d'un pétrole plus profond. L'ozocérite augmentait de plasticité. La proportion des suintements liquides et des dégagements gazeux rendait l'exploitation difficile. On ne pouvait plus maintenir les soutènements. Les explosions de grisou se multipliaient. On a alors recherché le pétrole par des son-

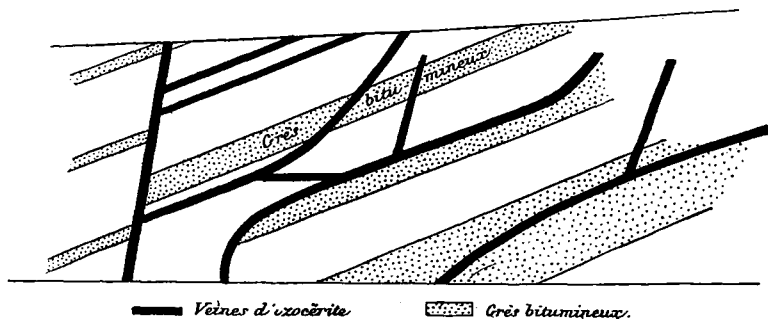


Fig. 88. — Coupe verticale montrant la disposition des veines d'ozocérite à Boryslaw.

dages, qui, de proche en proche, en ont atteint des niveaux de densité décroissante, jusqu'à 900 et 1 000 m. de profondeur.

La fig. 88 montre comment, dans les schistes et grès du saltzhon-gruppe, les veines d'ozocérite ont suivi, d'abord des joints de roches perméables et imperméables, puis les fractures de toute espèce que pouvait leur offrir la roche : fractures, soit parallèles à la schistosité et prenant la forme de joints, soit transversales.

Tchéléken. — Dans l'île de *Tchéléken*, sur la Caspienne, une ozocérite nommée *neftgil*, *naphadil*, *nephtil*, *neftedegil* ou *steintalq*, se trouve de même en grains ou veinules dans des sables et argiles au voisinage de sources de naphte.

¹ Voir Coll. Ecole des Mines, 1791. — 1881. PAUL. *Ueber das Ozokerit und Erdöl-vorkommen von Boryslaw* (Verh. KK. geol. R., mars-mai, p. 107. Vienne). — 1884. HASENPFUG. *Sur l'ozocérite* (Ann. Soc. géol. du Nord, t. 21, p. 253. Lille). — 188. ROMER. *Ueber das Vork. des Ozokerits oder Erdwachs und begl. Fossil. in die Sobieski Grilla bei Truskawiec in Ost Galizien* (Schl. Ges. für Vaterl. Cultur., 63^e Jahres Bericht, p. 119. Breslau). — 1887. RATEAU. *Sur l'ozocérite de Boryslaw* (Ann. des M., p. 147). — 1888. BABU. *Sur l'ozocérite de Boryslaw* (Ann. des M., p. 162). — 1888. PRZIBILLA et SYROZYSKI. *Sur l'ozocérite de Boryslaw* (Cuyper, t. 4, p. 16). — 1896. DE CLERCY. *Industrie de l'ozocérite en Galicie* (Génie civil, 18 déc.).

² Pages 548 à 557.

V. — BITUMES

Composition chimique. — Les bitumes¹ sont des hydrocarbures légèrement oxygénés et azotés, avec des proportions variables de soufre, sur lesquelles on se fonde pour établir entre eux une distinction importante. Leur teneur en carbone est analogue à celle des pétroles denses; mais la teneur en hydrogène est moindre et celle en oxygène supérieure; il y a donc eu oxydation d'une partie de l'hydrogène. Cette oxydation les rend d'abord visqueux, puis solides.

D'anciennes recherches de Boussingault avaient donné à cette idée une confirmation assez séduisante, mais reconnue depuis inexacte, en conduisant à considérer le bitume comme un mélange en proportions variables de deux substances distinctes: un hydrocarbure liquide, le pétrolène et un oxyde solide de pétrolène, l'asphaltène, dont l'abondance plus ou moins grande aurait rendu le pétrole plus ou moins consistant. En réalité, il a été vérifié depuis que la composition des bitumes, aussi bien que celle des pétroles, était beaucoup plus complexe et que les divers hydrocarbures naturels gazeux, liquides ou solides, formaient une série continue, où l'état physique seul, plus ou moins consistant, permettait d'établir des divisions.

Dans cette série, l'ozocérite représentant un premier terme, on peut placer ensuite le bitume de Judée qui est presque exempt d'oxygène, mais contient du soufre, puis le bitume de Guaracaro à la Trinidad qui arrive à 10 p. 100 de soufre, le japopote de Cuba, etc., et d'autres corps comme la gilsonite de l'Utah, l'élatérite (ou caoutchouc minéral), la grahamite. D'autre part, dans les applications, les goudrons extraits de la houille, du pétrole ou des schistes bitumineux viennent concurrencer les bitumes naturels.

Dans un bitume courant, on trouvera, par exemple, 86,6 de carbone, 11,4 d'hydrogène, 0,3 d'oxygène, 0,3 d'azote et 1,4 de soufre.

En ce qui concerne le groupement de ces divers éléments, les travaux de Le Bel et Müntz semblent avoir fait la lumière.

D'après eux, le premier principe qu'on peut extraire du bitume et qui s'obtient par deux distillations successives en faisant digérer dans l'intervalle avec du chlorure de calcium, est une huile incolore de densité 0,891 à 21°, soluble dans l'éther, isomère des essences de citron et de térébenthine, le pétrolène de Boussingault. Quant au principe colorant, il peut être isolé en dissolvant le bitume dans l'éther et en ajoutant de l'alcool, qui détermine la formation de deux couches: la supérieure rouge sombre, contenant une résine rouge et de la paraffine, l'inférieure complètement noire, donnant une poix qu'on peut faire cristalliser en écailles noires par dissolution dans le sulfure de carbone et à laquelle on réserve aujourd'hui le nom d'asphaltène. Sa composition correspond à 86,2 C et 8,8 H, tandis que celle de l'asphaltène complexe de Boussingault était: C = 74,23; H = 9,90; O = 15,87.

¹ En prenant ce mot dans son acception courante.

Usages des bitumes. — Le principal usage des bitumes est dans la voirie. On les fait entrer, comme addition avec des calcaires imprégnés de bitume ou asphaltes, dans la fabrication du mastic asphaltique. Nous reparlerons plus loin de l'asphalte; contentons-nous de dire pour le moment que la proportion de bitume à ajouter varie de 7 à 8 p. 100. Les bitumes de la Trinidad ont, pour cette application, un monopole presque absolu, qui s'étend même aux centres de production d'asphalte, où, comme à Seyssel, on pourrait trouver sur place des sables bitumineux.

D'autre part, le goudronnage des routes, qui a été imaginé dans ces dernières années et qui tend à se développer pour parer aux inconvénients d'une circulation de plus en plus intense, consomme des quantités notables de produits goudronneux et bitumineux.

Ces bitumes entrent également dans un certain nombre d'autres industries. La faculté qu'a le bitume de dissoudre le soufre et le caoutchouc lui assure un emploi dans la préparation industrielle des caoutchoucs. Le pouvoir qu'il a de se dissoudre dans l'éther, l'essence de térébenthine, la benzine, le sulfure de carbone, etc., en fait l'un des éléments des vernis. On sait de plus que les Egyptiens s'en servaient pour la conservation des corps : d'où son nom de baume des momies.

On a essayé encore d'en extraire une huile d'éclairage analogue au pétrole ; mais cette huile était trop impure et trop nauséabonde et l'on y a généralement renoncé.

Les bitumes spéciaux que l'on appelle bitume de Judée, manjak des Barbades, gilsonite de l'Utah, etc., ont des usages plus raffinés pour la fabrication des vernis, celle des couleurs, la photographie, etc.

Ils forment, avec de l'essence de térébenthine, de la cire blanche et du noir d'ivoire, la base de vernis noir ayant la propriété de ne pas se fendiller.

Un bon bitume pour cette application doit être, une fois réduit en poudre, d'un brun marron foncé et n'exhaler aucune odeur, à moins qu'on ne le chauffe.

Pour les couleurs au bitume, on se sert de bitumes ayant une transparence spéciale, avec lesquels on prépare des couleurs dont la nuance est très peu altérée au début. Ces couleurs, qui ont eu une grande vogue dans l'école de 1830 (Decamps, Delacroix, etc.), ont l'inconvénient de noircir rapidement à l'air.

Enfin, le bitume de Judée, dissous dans un vernis, jouit d'une sensibilité particulière à la lumière qui l'a fait prendre pour base des premiers essais photographiques et de certains procédés de gravure héliographique.

On trouve le bitume de Judée dans le commerce en gros morceaux mélangés de matières terreuses, de calcaire, d'argile et de sable. Il vaut jusqu'à 1 000 fr. la tonne.

Statistique des bitumes. — Les bitumes, étant dus à une altération superficielle d'hydrocarbures liquides, sont d'ordinaire mêlés avec les matières terreuses ou sableuses, dans lesquelles s'est faite leur infiltration. Quand cette imprégnation s'est opérée sur des calcaires poreux comme les craies, elle a pris un caractère d'homogénéité qui donne les asphaltes. Il

déviend alors impossible de séparer l'hydrocarbure du calcaire autrement que par réaction chimique ou dissolution. Si le calcaire était argileux ou siliceux, l'infiltration s'y est localisée dans les vides ou les fissures. Dans ce cas comme pour les sables bitumineux, on peut séparer par simple lavage à l'eau bouillante.

Etant donnée cette origine, on conçoit que les bitumes soient un élément très fréquent dans les régions pétrolifères ; on les retrouve dans des régions où le pétrole n'a pas encore été signalé, mais peut exister en profondeur. Ils affectent toujours une allure plus ou moins filonienne, tenant à la remise en mouvement dont ils procèdent. Mais, pour qu'un gîte de bitume ait de la valeur, il faut qu'il se présente avec une abondance et une pureté très rarement réalisés.

En fait, un très petit nombre de régions, parmi lesquelles, en premier lieu, l'île de la Trinidad et la province de Bermudez au Vénézuëla, ont un véritable monopole à cet égard. Nous nous bornerons à décrire quelques gisements typiques. Il a déjà été question plus haut incidemment des sables bitumineux qui existent en divers points de la France¹.

La statistique des bitumes naturels peut s'établir à peu près comme suit :

Trinidad.	132 000 tonnes en 1907 (196 000 en 1903).		
Vénézuëla.	35 000	—	—
Etats-Unis.	28 000	—	—
Albanie (Selenitza).	6 000	—	—
Barbades	800	—	—

En 1908, la Trinidad a exporté 61 000 t. de pitch lake asphalt aux Etats-Unis et la province de Bermudez au Vénézuëla, 35 200 t. de lake asphalt. La Trinidad exporte, en outre, 50 à 60.000 t. dans d'autres pays. En 1909, la production totale de la Trinidad a été de 146 000 t. ; en 1910, de 151 000 t.

Les Etats-Unis produisent, dans l'Utah, (1910) 28.000 t. de bitume très sulfureux, dit gilsonite, valant sur place environ 150 fr. la tonne, ou à New-York, 220 fr.

Il s'est, en outre, organisé, dans ces dernières années, aux Etats-Unis, une industrie considérable pour produire du bitume (asphaltum) avec les résidus des pétroles de Californie, puis du Texas et du Kansas. La Californie est partie de 58 000 t. en 1905 pour monter à 71 500 t. en 1906 et 96 000 t. en 1907.

Les sables bitumineux, qui existent en divers points du globe, n'ont généralement qu'une application locale.

Utah. — L'Ouest américain présente, sur les gisements de pétrole tertiaires², d'assez nombreux affleurements bitumineux, sans parler des bitumes produits industriellement avec les résidus de pétrole. Nous nous bornerons à décrire le gîte spécial de l'Utah.

Page 523.

GRIMLEY dans ENGLER et HÖFER, *loc. cit.*, p. 617. — Stat. améric. de 1907, p. 81. — Voir à ce propos, plus haut, p. 503, les filons d'albertite de la Nouvelle-Ecosse. Nous décrirons, plus tard, à l'occasion du vanadium, diverses veines problématiques de ce qu'on a appelé l'asphaltite.

On exploite dans l'Utah, à *Fort Duchesne* et *Dragon*, des gisements de gilsonite sous la forme de fissures verticales dans les grès et schistes éocènes. Ces fissures ont de 0, 60 à 5 m. de large. Les prix, qui atteignaient il y a quelques années 250 fr. la tonne, sont tombés à 150 t. Le fret de Dragon à New-York (par Mack) est, en outre, de 70 fr. On a estimé ces gisements à près de 30 000 000 de t. Leur extraction, qui était de 8 000 t. en 1907, est montée à 28 000 t. en 1910.

Mexique. — Au Mexique, nous avons déjà signalé le bitume très pur de Tuxpam au Nord de Vera-Cruz¹.

La Trinidad. — Le gisement du lac de la Braie à la Trinidad est le centre de production du bitume le plus important du monde. Nous renvoyons, pour sa situation géologique, à ce qui a été dit plus haut² et nous nous contentons de décrire plus spécialement son allure propre et son exploitation.

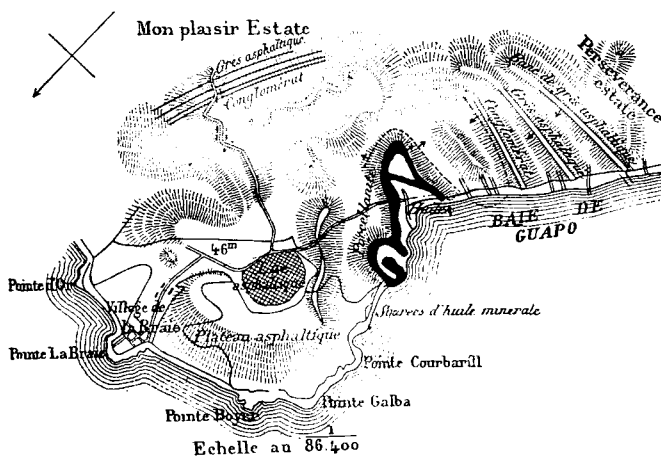


Fig. 89. — Carte du gisement de la Braie (Trinidad).

Le *lac de la Braie* est situé sur la côte Ouest de l'île vers la pointe de la Braie (ou Bréa), à 1 500 m. du rivage et à une altitude d'environ 30 à 40 m. (fig. 89).

Ce prétendu lac n'est, en réalité, pas autre chose qu'une étendue solide, où piétons et voitures peuvent circuler. Il est de 40 hectares environ et entièrement formé de bitume solide parsemé de quelques îlots de terre avec des arbres et sillonné de canaux sinueux remplis d'eau.

Au milieu du lac, il existe deux ou trois points d'émission du bitume, où la matière reste plastique et n'a pas encore perdu ses huiles volatiles. Un sondage de 60 m., fait dans cette partie, n'a pas atteint le fond; mais la profondeur moyenne est estimée à 5 m. Les canaux des environs sont

¹ Voir plus haut p. 541.

² Pages 542 et 543.

remplis d'une eau sulfureuse et colorée. On y sent l'odeur de l'hydrogène sulfuré.

Les géologues anglais admettent plusieurs centres anciens d'émission bitumineuse. Les canaux ne seraient pas autre chose que les lignes de suture des masses adjacentes, plastiques, mais plus assez imprégnées d'huile pour se souder exactement.

Le *cubage* du lac de la Braie conduisait, il y a une quinzaine d'années, à un chiffre d'environ trois millions de tonnes.

L'extraction, qui était assez restreinte jusque vers 1890, a pris, depuis ce moment, un grand développement et l'on a retiré en quatorze ans au moins 1 500 000 t. Le niveau du sol, qui semblait jusqu'alors se maintenir par suite de la plasticité de la substance, a baissé, dans cet intervalle, de plus de deux mètres. Actuellement on estime qu'on s'abaisse de 0,20 m. par an.

Exploitation. — L'asphalte brut est simplement pioché au pic et porté par des wagonnets au rivage dans des tombereaux.

L'*épuration* consiste d'ordinaire à chauffer la matière pour en chasser 30 p. 100 d'eau qu'elle contient.

Cette opération s'exécute dans des chaudières à sucre chauffées à feu nu, réunies par groupes de six.

On charge 8 t. de bitume à la fois. L'opération dure vingt-quatre heures ; elle exige la présence de cinq ouvriers et une consommation de deux cordes de bois.

Le bitume fondu est ensuite puisé à la poche et versé dans des barils à farine. On compte six barils pour une tonne.

Le bitume épuré se vend environ 60 fr. la tonne sous palan. Il faut ajouter le fret de 32 à 38 fr. pour la France. Le prix de vente en France est donc d'au moins 100 fr. ; mais, en France, on préfère généralement recevoir le bitume brut.

Guaracaro (Mont-Serrat). — Cumenge a décrit autrefois ce gisement, également situé à la Trinidad, qui contient un bitume analogue au bitume de la Judée, très chargé de soufre (jusqu'à 10 p. 100) et susceptible d'être employé comme *glance pitch* dans la fabrication du vernis. On trouve là une veine de 1 m. 30, sur environ 300 m. de long.

Il est possible que l'on doive rattacher cette formation à celle des *mud-volcanos*, ou volcans de boue, si fréquents sur le reste de l'île. Ces volcans sont constitués par des cônes de 0 m. 50 à 1 m. formés d'une argile bleu-tée, qui sort en suspension dans l'eau avec des hydrocarbures et de l'eau salée.

Côte Est de l'Adriatique (Spalato, Brazza, Selenitza). — Sur la côte Est de l'Adriatique, il existe une traînée de gisements bitumineux que l'on aurait pu être tenté de rattacher à la zone de flysch, visible le long de la côte au Sud de Trau et Spalato, mais qui, cependant, se trouve très fréquemment dans le jurassique : ce qui conduirait à chercher son origine dans le trias, dont la présence profonde est manifestée par de nombreux indices.

Du Nord au Sud, on a d'abord quelques asphaltes près de *Trieste* et

dans le golfe de *Fiume*. Puis viennent, près de *Spalato*, les asphaltes de Duaré et Morovicza (dans le jurassique). En face, dans l'île de *Brazza*, une dolomie jurassique suinte également du bitume.

La presque île de *Sabbioncello* contient des indices analogues. Puis on en retrouve au Montenegro, au N. E. de *Cettinjé*. Enfin, en Albanie, dans la région comprise entre la baie de Valona et *Selenitza* (Selenica) se trouvent, dans le pliocène, des gisements de bitume et d'asphalte avec volcans de boue sur les bords de la *Volutza*, qui méritent seuls une étude un peu plus complète : ces mines de Selenitza ayant produit 6 000 t. de bitume en 1906.

Les bitumes de *Selenitza*¹ ont été décrits par Coquand comme dus à un apport interne contemporain des sables, grès et conglomérats du pliocène supérieur, au milieu desquels on les rencontre en amas lenticulaires, brèches et stockwerks.

La description et les coupes de ce géologue, quoique fort intéressantes,

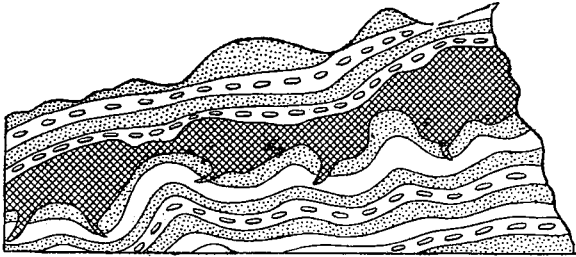


Fig. 90. — Coupe des gîtes bitumineux de Selenitza.

(Le pointillé représente les grès alternant avec les conglomérats. Le quadrillé figure le bitume.)]

ne sont pas absolument convaincantes à cet égard. Il semble que bien des phénomènes, qui y sont mentionnés, tiennent à des remises en mouvement, analogues à celles que nous avons rencontrées précédemment dans le Jura et l'Ain, pour la mollasse bitumineuse miocène. On peut en retenir que le bitume forme souvent des sortes de couches interstratifiées, ou d'amas lenticulaires ayant jusqu'à 3 m. d'épaisseur, avec pénétrations de haut en bas dans le mur (voir fig. 90). Ailleurs, aussi bien au mur qu'au toit, on observe une argile contenant des fragments anguleux de bitume, ou quelquefois des sortes de pisolithes larges au plus de 6 mm., très fragiles et à structure concentrique, qui fournissent évidemment un argument en faveur d'un apport, ou au moins d'un déplacement du bitume pendant le dépôt du terrain pliocène. Coquand a fait remarquer encore que certains amas n'ont aucune relation avec le reste du gîte et semblent s'être appliqués sur leur sous-sol en le moulant. Le bitume y était, selon lui, à l'état glutineux et sans matières volatiles ; car aucune fissure, ni

¹ Coll. Ec. d. M. 2284. — 1867. COQUAND. *Descr. géol. des gis. bitum. et pétrol. de Selenitza dans l'Albanie et de Chieri dans l'île de Zante* (B. S. G. F., 2^e, t. 24, p. 565. — cf. Tchihatcheff. *Géol. de l'Asie Mineure*, t. I, p. 424). — 1899. SÖHLE. *Das Asphalt Vorkommen auf der Insel Brazza in Adria* (Dalmatien) (Grazer Montan Ztg. f. ÖEst. t. 7, n^o 10, p. 235-237). J'ai reproduit plusieurs coupes de ce gisement dans les *Gîtes métallifères*, t. 1, p. 176 à 180.

aucune vacuole n'atteste le passage ou l'emprisonnement des gaz au moment de la solidification.

Mer Morte¹. — Une importante trainée de gisements bitumineux suit la vallée d'effondrement du Jourdain depuis sa source jusqu'à la Mer Morte. On n'y a encore nulle part reconnu le pétrole; mais les bitumes, asphaltes et gaz naturels sont assez nombreux pour donner l'idée de sonder en profondeur. Quelques petites exploitations d'asphalte ont eu lieu, notamment à Hasbeya.

En partant du Nord, on trouve : *Hasbeya* (Bir el Houmar) près des sources du Jourdain; puis *Mrani*, à l'Est du lac de Tibériade; *Nebi Musa* au N. E. de la Mer Morte; *Ouadi Mahavat* au Sud, etc.

Tous ces gisements se présentent au milieu de calcaires crétacés, parfois comme à Ouadi Mahavat, avec imprégnations latérales dans des alluvions anciennes adossées aux calcaires. Si on ne les considère pas comme ayant une origine éruptive actuelle, il faut donc les supposer provenant d'un terrain précrétacé.

Les gîtes sont généralement peu étendus et assez bien limités. Celui de Nebi Musa est un des plus développés.

A Hasbeya, l'imprégnation cesse peu à peu à mesure que le calcaire devient plus argileux. On voit également la teneur en bitume baisser quand augmente la teneur en silice.

Les calcaires imprégnés, très riches en fossiles, sont, tantôt bruns comme à Hasbeya, tantôt d'un beau noir comme à Nebi Musa. Exposés au soleil, ils perdent superficiellement leur coloration. Aussi, à la surface du sol, ne les distingue-t-on que par une légère coloration bleuâtre des marnes crayeuses blanchâtres qui les environnent et peuvent-ils quelquefois passer inaperçus.

Les calcaires, au voisinage des gîtes bitumineux, sont souvent sillonnés de nombreuses veines de gypse et renferment également du chlorure de sodium en faible proportion.

L'abondance de ces sels dans les terrains encaissants a été considérée par Anderson comme en rapport direct avec la venue du bitume. Elle nous semble plutôt correspondre à la suite d'un phénomène d'évaporation, qui avait déjà dû se traduire antérieurement par des phénomènes semblables.

A Ouadi Sebbeh et Ouadi Mahavat, on trouve, dans le lit du torrent, des fragments d'asphalte.

D'autre part, il flotte parfois, sur la Mer Morte, des fragments de bitume dits « bitume de Judée », qui viennent s'échouer en particulier sur la plage occidentale et sur les bords du Lisan, où les Arabes en recueillent parmi les graviers.

Ce bitume monte de la profondeur et forme des sortes d'îles, qui avaient

¹ Coll. d. M. 1827. — 1866. LARTET. *Sur le mode d'arrivée de l'asphalte dans la Mer Morte* (B. S. G. F., 2^e, t. 24, p. 12). — 1867. BOOTH. *Dead Sea Asphalt* (Lieut. Lynch's Report, p. 185). — 1870. LARTET. *Essai sur la géologie de la Palestine*, etc. (Ann. des Sc. géol., t. I, p. 5). — 1877. LARTET. *Expl. géol. de la Mer Morte* (Arthur Bertrand, 332 pages). — 1914. L. DE LAUNAY. *Asie*, p. 646. (Voir une descr. avec fig. dans les *Gîtes métallifères*, t. 1, p. 171 à 173.)

été remarquées dès l'antiquité et que Strabon a décrites. Les tremblements de terre ont généralement pour effet d'en augmenter la proportion.

C'est ainsi qu'en 1834, après une forte secousse, une masse de plus de 20 t. vint échouer sur l'extrémité Sud ; en 1837, le même fait se reproduisit après un choc qui ébranla toute la Syrie et une masse d'asphalte de 15 t. jaillit à la surface.

On peut supposer que ce bitume spécial arrive du fond du lac, fourni, soit par un remaniement hydrothermal des gîtes bitumineux précédents, soit par des suintements de pétrole, source première de tout cet ensemble hydrocarboné.

Nous avons vu précédemment quelque chose d'analogue au grand Lac Salé de l'Utah¹.

On peut être tenté d'établir un rapprochement entre ces pétroles de la Mer Morte et ceux qui se trouvent à l'Est de Suez, à l'extrémité du Sinaï, sur une fosse d'effondrement convergente avec la précédente.

VI. — CALCAIRES ASPHALTIQUES²

Composition, propriétés, usages et prix. — On réserve, dans l'industrie, le nom d'asphalte à des calcaires imprégnés très intimement et par pénétration poreuse de principes bitumineux, que l'on doit appeler plus exactement calcaires asphaltiques.

Ces calcaires sont employés dans les travaux de voirie sous deux formes principales : 1^o poudre d'asphalte comprimé pour chaussées exigeant un asphalte naturel de qualité supérieure ; 2^o mastic asphaltique, obtenu par addition de bitume à des calcaires pauvres ou irrégulièrement imprégnés (trottoirs, etc.). Accessoirement on fabrique, avec les mêmes calcaires inférieurs, des pavés d'asphalte aggloméré, utilisés à peu près comme les pavés de bois et l'on a commencé à parler de l'asphalte armé analogue au béton armé.

L'asphalte de bonne qualité, destiné à être employé en *poudre comprimée* dans les chaussées, présente l'aspect d'une roche tendre par la température de l'été, dure pendant l'hiver ; à grain fin, couleur de chocolat foncé, bien uniforme, sans parties noires ou blanches. Vers 50 ou 60°, elle se laisse écraser entre les doigts. Exposée pendant quelques heures à un soleil ardent, elle tombe d'elle-même en une poussière brune et onctueuse. Quand on l'examine au microscope, on reconnaît que cette roche est formée de petits grains de calcaire très fins recouverts chacun d'une mince pellicule de bitume et agglutinés entre eux par l'intermédiaire de cette pellicule.

Si l'on chauffe un petit morceau de cette matière, surtout après l'avoir réduite en poudre, le bitume, qui lui sert de ciment, se ramollit et perd sa

¹ Tome 1, page 531.

² Voir, sur l'asphalte en général : 1874. LÉVY. *De l'asphalte* (Ind. Min., 3^e, t. 1, p. 67). — 1888. MALO. *De l'asphalte*. — 1889. NARCY. *Bitumes* (Bull. Ecole des Mines). — 1899. JEEP. *Der Asphalt und seine Anwendung in der Technik* (Leipzig, Nöthling). — 1901. KOVACS. *Ueber Asphalt, sein Vorkommen*, etc. (Budapest, Kilian, 30 p.).

force agglutinante ; les molécules se décollent et s'éparpillent en poussière. Si alors, tandis qu'elle est encore à la température de 110 ou 120°, on ramasse cette poussière et si on la comprime énergiquement sur une fondation en béton, elle reprend, par le refroidissement sous sa nouvelle forme, sa consistance première.

L'asphalte, pour offrir ces qualités, doit être très régulièrement imprégné, ne pas contenir des parties trop dures ayant résisté aux hydrocarbures, et renfermer une proportion de bitume, qui ne doit pas être trop forte, — car alors la roche serait trop grasse, — ni descendre au-dessous de 5 p. 100. Le cahier des charges de la ville de Paris exige qu'il n'y ait pas plus de 5 p. 100 de matières étrangères et que la teneur moyenne en bitume soit comprise entre 6 et 13 p. 100 : aucun produit à moins de 6 p. 100 ne pouvant intervenir. Il n'admet pas d'autres provenances que celles de Seyssel (Ain), du Val de Travers (Suisse), de Saint-Jean de Maruéjols et Mons (Gard), de Volant (Haute-Savoie) et de Ragusa (Sicile).

La valeur d'un calcaire asphaltique dépend, en partie, de sa teneur ; elle dépend aussi beaucoup de la nature de la roche imprégnée. L'imprégnation dans un calcaire gréseux ou, à plus forte raison, dans un grès, outre qu'elle est toujours incomplète, donne de mauvais résultats.

Si l'on compare, en effet, les coefficients d'usure d'un calcaire et d'un grès provenant du même gisement bitumineux, on constate que celui du grès atteint 60, tandis que celui du calcaire est de 42 à 49¹. C'est que, dans les grès, les grains de quartz et de feldspath sont seulement noyés dans le bitume, tandis que, dans la craie, celui-ci a si bien pénétré par porosité qu'il est impossible de l'extraire par un lavage à l'eau bouillante. Daurée, en plaçant dans du bitume de Pechelbronn de la craie et du grès tertiaire, a montré, en outre, que la craie fixait 17 à 24 p. 100 de bitume, alors que le grès n'en fixait que 8.

En prenant même divers calcaires propres à la confection des chaussées en asphalte comprimé et tenant 8 p. 100 de bitume, on a, suivant la provenance, des différences de prix de plus d'un tiers. On cotera, par exemple, la tonne de Pyrimont Seyssel ou du Val de Travers 50 fr. contre 44 pour la roche striée de Mons (Gard), ou 35 pour le Ragusa. Dans ce chiffre, le broyage entre pour 6 à 12 fr. Quand les asphaltes sont de qualité médiocre, on ne peut les utiliser, après une fabrication industrielle relativement coûteuse à l'usine, que sous forme de mastic asphaltique ou de briques agglomérées.

Pour obtenir le *mastic asphaltique*, on chauffe, dans des chaudières de tôle, l'asphalte en poudre avec du bitume libre (généralement du bitume de la Trinidad mélangé avec des goudrons de schistes d'Autun ou de l'Allier) dans la proportion de 3500 kg. de poudre d'asphalte pour 250 à 300 kg. de bitume ; on continue la cuisson jusqu'à ce que le mélange devienne pâteux et on coule en pains de 25 kg.

Lorsqu'on veut employer le mastic asphaltique, on jette d'abord, dans une chaudière chauffée en dessous, 9 p. 100 de bitume libre ; puis du

¹ On appelle coefficient d'usure la quantité dont s'use un échantillon donné lorsque, dans les mêmes conditions, le grès d'Yvette, pris pour point de comparaison général, s'est usé d'une unité.

mastic concassé; de nouveau 1 p. 100 de bitume et une seconde charge de mastic. Après quoi, on additionne de sable de rivière dans la proportion de 60 p. 100 du poids de mastic, on brasse et on applique la masse fondue sur un fondement en béton.

Le prix de revient d'un mastic asphaltique peut se calculer ainsi, en employant du bitume de qualité supérieure :

Bitume : 70 kilogrammes à 300 francs la tonne	21 fr.
Poudre d'asphalte, 1 tonne	17
Main-d'œuvre pour cuite et moulage	3,70
Houille brûlée	2,05
Entretien	0,50
	44,25

Enfin les *pavés en asphalte comprimé* sont obtenus en partant d'asphalte naturel que l'on met d'abord en poudre. Après quoi, on le torréfie à 120° dans des appareils à rotation continue afin d'obtenir la température voulue pour l'agglomération et de chasser, en même temps, l'eau et les huiles légères. On fait alors passer à la presse hydraulique, comme pour les briquettes de houille¹.

Cette industrie de l'asphalte, dont on retrouve des traces dans les constructions babyloniennes, date, en réalité, du commencement du XVIII^e siècle. C'est en 1710 que le D^r Eyrini d'Eyrinis découvrit le gisement suisse du Val de Travers. En 1838, furent établis à Paris les premiers trottoirs asphaltés. Aujourd'hui l'extraction de l'asphalte est représentée approximativement par les chiffres suivants, qui doivent être pris sous toutes réserves, cette statistique étant tout à fait insuffisante :

Italie et Sicile (Ragusa, Abruzzes)	162 000 tonnes.
Allemagne (Hanovre).	77 000 —
France (Ain, Gard, Puy-de-Dôme, Haute-Savoie).	45 000 —
Suisse (Val de Travers, approximativement).	20 à 30 000 —
Russie.	20 000 —
Hongrie	4 100 —

En 1907, la France a produit 33 000 t. de calcaire asphaltique contre 38 000 t. en 1906; en 1909, 44 826 t. Depuis 1894, ce chiffre oscille entre 29 et 40 000 t.

La production française se répartit ainsi, en 1909, d'après les documents officiels : 15 754 t. à 16 fr. 22 sur le carreau de la mine dans le Gard, 14 453 t. à 13 fr. 25 dans le Puy-de-Dôme, 12 316 t. à 14 fr. 03 dans l'Ain et 2 303 t. à 14 fr. dans la Haute-Savoie.

L'Italie produisait, en 1890 : à la mine de Ragusa (Sicile), 37 235 t. valant 24 fr.; dans les Abruzzes 7 890 à 39 fr. 32; à Frossinone (district de Milan) 600 t.; au total 45 125 t., obtenues par 221 ouvriers. En 1907, les mêmes mines ont produit : 123 000 t. à Ragusa; 3 884 t. dans les Abruzzes (Valle del Pescara); 2 300 à Filettino (province de Rome); au total, 161 000 t. de calcaire asphaltique valant 2 201 000 fr. En 1909, le total est resté sensiblement le même.

¹ Voir *La Nature*, n° 1468. 13 juillet 1904.

Aux *Etats-Unis*, la production du calcaire asphaltique (qu'il ne faut pas confondre avec l'« asphaltum », dans lequel la statistique américaine englobe tous les produits bitumineux et goudronneux) se borne à fort peu de chose : 2 à 3000 t. dans le Kentucky.

Géologie des asphaltes. — Nous considérons, d'une façon générale, tous les calcaires asphaltiques comme ayant été imprégnés par un phénomène postérieur à leur dépôt, dont l'origine première est plus profonde. On a souvent soutenu le contraire et l'on s'est notamment fondé sur l'existence de certains niveaux calcaires particulièrement riches en asphalté dans une étendue assez considérable, pour admettre que ces calcaires avaient été bitumineux dès l'origine. La même observation s'applique à ces minerais de zinc et de plomb concentrés de préférence dans tels ou tels bancs calcaires, auxquels on a en conséquence donné le nom de calcaires métallifères. Pour nous, dans les deux cas, il y a eu seulement, dans ces bancs calcaires, soit par suite de leur porosité, soit par l'effet d'un couvercle imperméable schisteux ou marneux qui leur était superposé, conditions plus particulièrement favorables à l'imprégnation. Mais, lorsqu'on regarde les choses en détail, on voit toujours que l'imprégnation asphaltique est limitée à des portions lenticulaires du calcaire et s'arrête, par exemple, lorsque ce calcaire se charge d'argile, ou devient siliceux. On voit également, dans bien des cas, que cette imprégnation atteint son maximum le long de quelques fractures, par lesquelles se fait une venue bitumineuse. Enfin, les caractères stratigraphiques du calcaire imprégné ne concordent nullement avec les conditions où on peut supposer le dépôt simultané d'hydrocarbures abondants, tandis que leur nature physique rend l'imprégnation postérieure très vraisemblable. Cette imprégnation asphaltique présente fréquemment un rapport intime avec des pétroles plus profonds et, dans bien des cas, le premier phénomène observé à la surface a conduit à découvrir l'autre en profondeur.

Nous ne décrirons pas ici tous les calcaires asphaltiques qui peuvent se trouver dans le monde entier. Beaucoup d'entre eux se sont déjà trouvés mentionnés incidemment en étudiant les pétroles¹ et l'on peut dire qu'il s'est produit de l'asphalte de plus ou moins bonne qualité toutes les fois que des calcaires poreux se sont trouvés sur le passage de remises en mouvement pétrolifères. Ceux, dont la valeur industrielle est médiocre par elle-même, doivent être surtout à considérer comme des indications à cet égard. Nous nous bornerons donc maintenant à quelques gisements typiques, choisis de préférence dans les régions les plus voisines de nous et pouvant, par conséquent, contribuer à fournir le marché de la France ou celui des pays voisins.

Nous étudierons ainsi, sans revenir en détail sur la question d'origine et d'âge géologique qui a été étudiée précédemment : les asphaltes français du Gard, de l'Auvergne et de l'Ain ; les asphaltes suisses du Val de Travers ; ceux qui existent en Sicile à Ragusa ; ceux de Russie et du Tyrol.

¹ Voir, notamment, p. 503 (Nouvelle-Écosse), 517 (Volga), 522 à 525 (France), 535 (Texas), 546 (Alsace), 565 (Italie).

1^o ASPHALTES DU GARD¹

Les asphaltes du Gard, autrefois assez insignifiants, ont pris, depuis une campagne de sondages effectuée de 1902 à 1906, une importance de premier ordre dans la production française.

Comme nous l'avons déjà dit en deux mots², le grand massif primaire, où se trouvent les bassins houillers de la Grand'Combe et de Bessèges, est limité à l'Est par une longue faille N.E. allant d'Alais à Saint-Ambroix, au delà de laquelle on trouve, dans une fosse large de 10 km. et longue d'environ 60 km., des terrains tertiaires, généralement lacustres, qui plongent d'une façon uniforme vers le massif primaire, comme s'ils voulaient disparaître au-dessous de lui. A l'Est, cette zone tertiaire est limitée par du crétacé et, le long de cette bordure Est, dans les terrains infratongriens, qui, sauf un peu d'éocène, représentent la base de la série tertiaire, on trouve, avec une grande extension, des calcaires asphaltiques. Le développement industriel de ceux-ci a été surtout reconnu au Nord de cette trainée vers Saint-Jean de Maruéjols; mais ils existent également plus au Sud dans toute une série de petites concessions, pour la plupart aujourd'hui abandonnées. Nous avons vu plus haut comment on peut se demander si ce bitume se trouve à peu près dans sa position primitive avec une origine tertiaire, ou s'il provient de terrains antérieurs, de schistes bitumineux cénomaniens analogues à ceux que nous allons trouver à Vagnas dans l'Ardèche, ou même des couches triasiques, souvent gypsifères, qui doivent vraisemblablement exister en profondeur. Sans revenir sur cette question, voici, en parcourant la région du Sud au Nord, comment se présentent les principaux affleurements.

A *Mons*, on exploite un horizon de calcaire asphaltique d'une quinzaine de mètres d'épaisseur totale contenant trois zones bitumineuses et plongeant à environ 30° W. Les couches, d'épaisseur très variable même dans un rayon restreint, sont, en outre, inégalement composées de bancs utiles et de bancs stériles, parfois avec une disposition striée où l'on a voulu voir un caractère sédimentaire, mais qui s'explique tout aussi bien par l'imprégnation d'un calcaire non homogène.

Le gisement a été reconnu sur 140 m. de haut et semble, plus bas, s'appauvrir. Le calcaire bitumineux n'est séparé du calcaire néocomien que par un conglomérat également néocomien.

A *Servas*, on n'a trouvé généralement que des calcaires assez pauvres, contenant par exemple des vacuoles, ou suintements de bitume, sauf au ruisseau de la Poix, où la lentille minéralisée, avec le même caractère d'un remplissage de fentes ou de cavités, a été un peu plus développée.

A *Cauvas*, on a surtout reconnu, vers 1877, un banc de calcaire gréseux à apparence de mollasse, inutilisable, dont la position stratigraphique était plus haute que celle du niveau infratongrien ordinaire.

¹ 1853. PARRAN. *Sur un gisement d'asphalte aux environs d'Alais* (Ann. d. M., 5^e série, t. 4, p. 334). — 1901. FABRE. Carte géologique au 1/80.000 d'Alais. — 1906. NICOU. *Les calcaires asphaltiques du Gard* (Ann. des mines, t. 10, p. 513 à 568).

² Voir plus haut, p. 522 et fig. 67.

La concession abandonnée des *Fumades* contenait, comme le précédent quartier, des calcaires gréseux bitumineux alternant avec des marnes ou avec des calcaires stériles. On a rencontré là plusieurs bancs de lignite venant s'intercaler dans la série asphaltique, mais sans continuité.

Au Nord enfin se trouve la concession de *Saint-Jean-de-Maruéjols*, qui fournit à elle seule la production du Gard. C'est là que les derniers travaux de recherches ont été opérés par diverses compagnies, dont deux sociétés anglaises The Val de Travers Asphalt Paving Cy, qui possède aussi le Val de Travers et Seyssel, The Soc. française des asphaltes Id., propriétaire de l'ancienne concession de Saint-Jean et la Société française du Centre, qui travaille dans le Puy-de-Dôme et l'Ain. On exploitait auparavant, dans un trapèze ayant 460 m. de grande base sur la direction de la couche et 260 m. un peu plus loin, une couche qui plonge à 20 p. 100 vers l'Ouest et qui, en dehors de cette pente, est affectée par diverses failles. Les sondages, que l'on a poussés couramment à 200 m. et même, dans une zone où ils n'ont pas donné de résultats, jusqu'à 466 m., semblent montrer l'existence d'une grande imprégnation asphaltique inclinée à 15 ou 20°, découpée par quelques failles et pouvant avoir une épaisseur totale de 15 m., que commence à exploiter la nouvelle concession de Fontcouverte. Le raccordement des divers sondages ne peut, d'ailleurs, se faire sans une grande part d'hypothèses ; car ces terrains lacustres sont essentiellement variables d'un point à l'autre et, pour prendre des niveaux bien caractéristiques, on voit, par exemple, des couches de silex ou de lignite se coincer en quelques mètres. On peut, pour donner une idée de la valeur du gisement, convenir de représenter une couche bitumineuse par son épaisseur réduite en calcaire à 10 p. 100 de bitume, avec un coefficient de répartition qui donne le rapport de cette épaisseur réduite, sur laquelle on suppose tout le bitume concentré en gardant cette teneur type et l'épaisseur réelle. Les sondages ont donné en moyenne 6 à 10 m. d'épaisseur réduite, avec un coefficient de répartition de 50 p. 100 à 60 p. 100.

Enfin, assez loin vers le Nord, se trouve, dans l'Ardèche, le gisement de *Vagnas*, où l'on a exploité, jusqu'en 1869, des schistes bitumineux céno-maniens très analogues aux schistes d'Autun, associés comme ceux-ci avec des lignites.

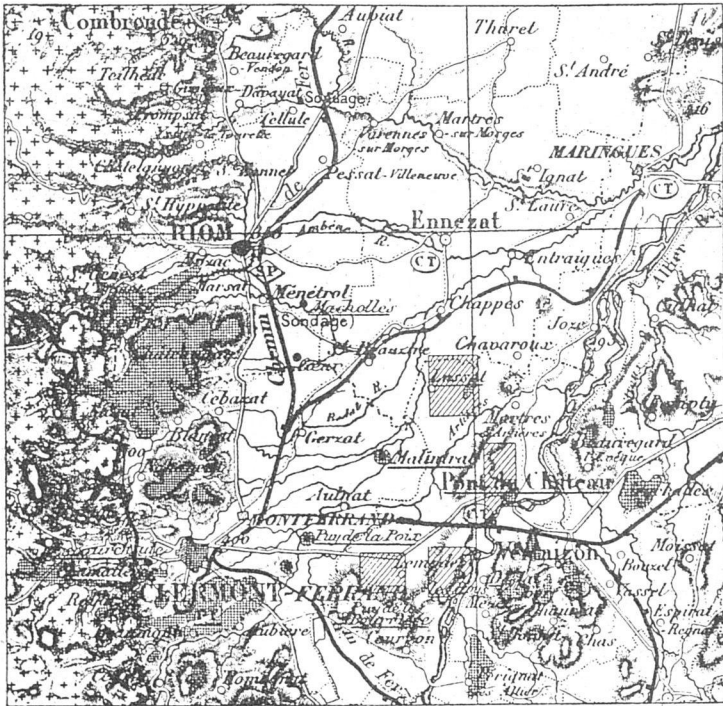
2° ASPHALTES D'AUVERGNE¹

L'industrie du bitume et de l'asphalte a commencé dans le département du Puy-de-Dôme en 1831, par quelques travaux sur la concession des sables bitumineux de l'Escourcade. Plus tard, un grand nombre d'autres concessions furent successivement instituées à Pont-du-Château, Lussat, Malintrat, etc..., qui, après des vicissitudes diverses, passèrent aux mains de la « Société des sources de bitume et d'asphalte du Centre » dont le centre principal est à Pont-du-Château.

¹ Gîte visité en 1900. — Coll. Ec. d. M. n° 2380. — Feuille de Clermont-Ferrand au 1/80.000. — 1901. L. DE LAUNAY. *Excursion à quelques gîtes minéraux et métallifères du Plateau central* (Congrès géologique international, p. 24 à 27 et la Nature, n° 1468, 13 juillet 1901). — Voir plus haut page 544.

Géologiquement, le bitume se rencontre dans la région comprise entre Clermont-Ferrand, Riom et l'Allier, dans un carré d'environ 16 km. de côté, imprégnant les divers étages du tertiaire (fig. 91).

Ainsi que le montre notre carte, ces gisements semblent, pour une cause quelconque, localisés dans les divers niveaux du terrain tertiaire au voisinage des basaltes les plus récents et souvent au contact même des pépérites basaltiques (Lussat, Malintrat, Pont-du-Château, Puy de la



Gisements de bitume. Basaltes et pépérites basaltiques.
 Concessions de bitume et asphalt. Limites des terrains cristallins et du tertiaire de la Limagne.

Fig. 91. — Carte des gisements bitumineux de la Limagne. Echelle au 1/320 000^e.

Poix, etc.). Quand on sort de la zone à expansions basaltiques vers le Nord, les mêmes terrains ne renferment plus de bitume, tandis qu'au Sud on en trouve, soit dans les calcaires à Hélix Ramondi (Aquitarien 48) à Pont-du-Château et aux Roys, soit dans les marnes inférieures du Puy de la Bourrière (Tongrien supérieur, 46), soit dans les sables et arkoses sannoisiens (46), à Lussat et à l'Escourchade, soit dans les pépérites elles-mêmes à Malintrat, au Puy de la Poix, etc.¹.

¹ Au voisinage de l'Escourchade, on a même constaté des imprégnations bitumineuses dans le granite, lors du creusement des tranchées du chemin de fer de Tulle (Michel Lévy. *Notes sur la Chaîne des Puys*, B. S. G. F., 1891, p. 887).

A *Lussat*, on a exploité, jusqu'en 1885, une poche de bitume dans le sable bitumineux, afin de l'utiliser dans la fabrication du mastic asphaltique ; le mastic, obtenu ainsi, avait le défaut d'être trop gras et les difficultés de boilage dans la mine étaient très grandes.

A *Malintrat*, on connaît des fissures pleines de bitume dans la pépérite, sans imprégnation proprement dite.

A *Pont-du-Château* l'imprégnation asphaltique est très nettement localisée dans un banc de calcaire concrétionné à Hélix Ramondi, épais de 4 à 6 m., sous une couche de calcaire marneux gris ¹ et au-dessus de bancs de calcaires marneux ² alternant avec des lits sableux : bancs qui eux-mêmes reposent sur des pépérites.

Il est incontestable que cette imprégnation est postérieure au dépôt des calcaires imprégnés, indépendante de ce dépôt et seulement localisée au milieu d'eux par suite de circonstances physiques et chimiques : l'argile, qui existe dans les terrains superposés ou sous-jacents, étant, d'après un dicton des mineurs, la grande ennemie du bitume. On rencontre toutefois, immédiatement au mur, quelques petites fissures bitumineuses, beaucoup plus rares au toit. Ce bitume est donc venu d'en bas, soit par un phénomène primitif, soit par une simple remise en mouvement secondaire, toute naturelle avec une substance aussi essentiellement mobile.

Sa montée est même en rapport très net avec deux fractures Nord-Sud, distantes de 150 m. l'une de l'autre, fractures bien visibles dans la mine, par lesquelles il coule du bitume en quantités assez abondantes pour couvrir le sol de toutes les galeries avoisinantes³ et à partir desquelles l'imprégnation dans les calcaires va en décroissant assez vite.

L'une de ces fractures, par exemple, met en contact avec le calcaire à hélix imprégné, un calcaire marneux non imprégné, ou, en d'autres points, une partie plus argileuse du calcaire à hélix, qui a également échappé à cette imprégnation. Cette fissure a de 30 à 40 cm. de large, et, quand on l'aborde dans les travaux, on la voit, dans toute sa partie haute, absolument vide, le bitume en étant déjà coulé, tandis qu'à sa base le bitume monte comme une source. Il arrive même que la fissure, très visible sur le sol et un peu sur les parois latérales de la galerie, soit invisible à la voûte, où elle se sera refermée.

Au voisinage de la fracture, on observe de tous les côtés, dans les parois des galeries, des stalactites de bitume suintant des pores du calcaire ⁴. Puis, en s'écartant, on a une imprégnation plus régulière⁵ et sans cet excès de bitume anormal, formant des asphaltés proprement dits, et l'on arrive progressivement à des calcaires stériles.

Dans la zone d'imprégnation, qui peut avoir 6 à 800 m. de long sur 150 à 200 m. de large, il y a, une très grande irrégularité, tenant à la constitution du calcaire. Les Hélix Ramondi remplis de bitume y sont abondants. La zone est limitée par une érosion quaternaire.

¹ Ech., 2380-1.

² Ech., 2380-2.

³ Ech., 2380-6.

⁴ Ech., 2380-3.

⁵ Ech., 2380-5.

Comme substances accessoires, on peut remarquer que le bitume renferme une très faible proportion de gaz, dont on constate la présence en promenant une lampe sur le ruisseau de bitume solidifié, qui couvre le sol de quelques galeries. Un échantillon, analysé sur ma demande à l'Ecole des mines, contenait 2, 69 p. 100 de soufre. Quant à la silice, elle est très rare, bien qu'on ait trouvé, en un seul point, de la silice concrétionnée.

3° ASPHALTES DE SEYSSEL ET DU CREDO ¹

Nous avons décrit précédemment² la zone bitumineuse qui s'étend, parallèlement aux plissements du Jura, depuis le massif du Credo jusqu'au Sud de Belley. Il nous reste à donner quelques détails complémentaires sur la mine de Seyssel, qui est en France l'un des centres principaux de production de l'asphalte.

La concession de Seyssel, qui s'étend le long du Rhône de Bellegarde à Seyssel, est exploitée sur les deux rives du Rhône, à Pyrimont.

L'exploitation la plus importante, située sur la rive gauche (Est), porte sur sept couches successives de calcaire barrémien (urgonien, 33), dont les parties imprégnées forment une colonne un peu inclinée comme une série de marches d'escalier se surmontant l'une l'autre. Les calcaires eux-mêmes sont à peu près horizontaux, sauf en aval où, brusquement, la couche inférieure prend une pente vers le Sud. A l'Ouest, le gisement est limité par la vallée d'alluvions du Rhône ; à l'Est, il l'est également par un conglomérat glaciaire contenant des blocs d'asphalte bien roulés, dont on ignore la provenance. Au-dessus des calcaires urgoniens, la molasse marine miocène, représentée par des sables verts, est, elle aussi, imprégnée de bitume, quoiqu'elle contienne à sa base souvent quelques centimètres d'une brèche à galets d'asphalte prouvant qu'il y avait eu déjà formation bitumineuse antérieure.

Sur la rive droite, l'exploitation, plus récente, est seulement à ciel ouvert.

Les observations que nous avons pu faire sur place, sont les suivantes.

Le calcaire asphaltique, qui est d'une teinte brune, contient fréquemment des noyaux blancs stériles ayant, soit par leur dureté plus grande, soit par une certaine humidité, résisté à l'imprégnation. Autour de ces noyaux blancs, il y a passage graduel. Il nous paraît incontestable que le bitume est arrivé là postérieurement au dépôt des couches en pénétrant dans le calcaire par porosité. Reste à préciser l'âge de cette venue. Malo, ayant remarqué que les parties blanches sont souvent très fendillées à côté d'asphaltes non fendus, en a conclu que le bitume avait prêté de l'élasticité au calcaire et, par suite, que sa venue était antérieure au plissement du Jura, qui ne paraît avoir commencé qu'après la molasse.

Dans les sables mollassiques, on constate souvent, à côté d'imprégna-

¹ Gisements visités en 1889. — 1838. *Asphaltic mine of Pyrimont Seyssel* (Journal of the Franklin institut., t. 26, p. 276). — 1888. MALO. *L'Asphalte*.

² Pages 522 à 525.

tions nettement transversales et filoniennes, une apparence assez imprévue de sédimentation horizontale par bancs verts stériles et bancs noirs bitumineux alternant. Cependant, en regardant attentivement, on voit des pénétrations du bitume du banc noir dans le banc vert. En général, il ne semble pas y avoir passage graduel d'un banc vert à un banc noir. C'est pourquoi Malo a émis l'hypothèse que, dans ces parties-là, l'imprégnation bitumineuse avait été antérieure à la sédimentation et il a remarqué, comme confirmation, que ces sables, disposés par couches, étaient beaucoup moins riches en bitume que d'autres où le bitume forme des veines disposées en tous sens, comme si les premières avaient été postérieurement délavées. Il est certain que, dans les galeries de la mine de Pyrimont, ces bancs, alternativement verts et bruns, présentent parfois, sur plusieurs mètres, une continuité remarquable; mais, ensuite, on retrouve souvent des parties bitumineuses inclinées.

Il semble qu'il y ait eu là plusieurs remises en mouvement successives : l'une ayant amené le bitume dans l'urgonien à partir d'une origine inconnue, l'autre ayant postérieurement imprégné la mollasse, peut-être par simple départ latéral de l'imprégnation précédente.

4° ASPHALTES SUISSES DU VAL DE TRAVERS¹

Les asphaltes du canton de Neuchâtel forment, comme nous l'avons vu plus haut², une sorte de prolongement des asphaltes de Seyssel, Frangy, Chézéry, etc., avec cette particularité remarquable qu'on les retrouve dans des calcaires du même étage.

Ces gisements sont d'autant plus intéressants qu'ils ont été les premiers découverts en Europe et que c'est là qu'a été imaginé l'emploi de l'asphalte en poudre comprimée. Ceux de Saint-Aubin, Vallorbes, Chavamay, Orbe, sont trop pauvres en bitume pour être exploités; celui des Epoissats a servi à la fabrication d'un ciment très renommé; mais le plus important est celui du Val de Travers qui donne lieu, depuis une quarantaine d'années, à une importante extraction.

Les calcaires bitumineux du Val de Travers se trouvent, comme ceux de Seyssel, dans l'étage barrémien (urgonien). Un pli synclinal, encaissé dans le jurassique, comprend, de la base au sommet, du néocomien, du barrémien, de l'aptien, de l'albien et de la mollasse miocène. Le barrémien lui-même se montre avec deux faciès distincts et superposés : le calcaire à caprotines et le calcaire jaune inférieur à échinodermes. C'est le premier qui contient surtout du bitume, soit à l'état visqueux et suintant lorsqu'il est compact, soit à l'état d'imprégnation lorsqu'il est crayeux et grenu, avec des irrégularités analogues à celles que nous avons signalées à

¹ 1868. KNAR. *Théorie de la formation de l'asphalte au Val Travers* (Mon. scient., p. 314). — 1869. JACCARD. *Description géologique du Jura vaudois et neuchâtelais* (Berne). — *Etudes sur l'asphalte et sur le bitume au Val Travers, dans le Jura et la Haute-Savoie*. — 1879. DE TRIBOLET. *Notes sur les gisements d'asphalte de Hanovre comparés à ceux du Val Travers* (Bull. de la Soc. des sciences naturelles, t. 9, p. 266. Neuchâtel). — 1890. JACCARD. *Origine de l'asphalte* (Eclogæ geologicæ Helvetiæ).

² Page 525.

Seyssel, accusant le mécanisme de l'imprégnation postérieure étendue à la façon d'une tache d'huile.

Le banc asphaltique exploité au Val de Travers, correspondant à la partie crayeuse et poreuse du barrémien, se trouve à la partie supérieure de cet étage, au contact des marnes aptiennes. Les mineurs distinguent le *bon banc* qui tient de 8 à 12 p. 100 de bitume et la *crappe* qui forme une transition entre le bon banc et le calcaire stérile. Sur la zone d'affleurement, l'épaisseur asphaltique est en moyenne de 7 m.

A côté de cette imprégnation principale dans le barrémien (33), il faut remarquer qu'il existe aussi des calcaires bitumineux aptiens (44) séparés des premiers par des marnes stériles et par de la mollasse bitumineuse. Quand on s'éloigne un peu plus, on trouve, jusque dans le jurassique, les imprégnations analogues qui ont été signalées dans un paragraphe précédent ¹.

5° ASPHALTES DE SICILE (RAGUSA) ²

Nous avons déjà signalé en Italie deux centres d'exploitations asphaltiques, celui du Val de Pescara (Chieti) et celui de Ragusa (Sicile). Nous ne reviendrons ici que sur le second, dont l'extraction varie de 80 à 120 000 t (120 000 t en 1910, 77 000 t. en 1909, et 123 000 t. en 1907 contre 105 000 t. en 1906) à environ 13,50 fr. la tonne, et qui fournit à l'exportation en Angleterre, Allemagne et Amérique.

Dans la province de Syracuse, on exploite, depuis assez longtemps, des couches d'asphalte importantes à quelques kilomètres au Sud de Ragusa, dans la direction du port de Mazarelli.

La roche asphaltique fait partie d'un calcaire miocène très fossilifère.

Auprès de Leporino, des escarpements taillés à pic montrent l'existence de l'asphalte à deux niveaux distincts : l'inférieur puissant de 5 m, avec quelques nerfs de calcaire interposés; le supérieur, épais de 5 à 20 m., séparé du premier par 25 m. de calcaire stérile. Il existe, en outre, aux environs, de puissants amas d'asphalte dont on ne voit aucune communication avec la masse encaissante.

Cet asphalte, susceptible d'être scié et taillé, a été d'abord exploité pour en obtenir de grands blocs débités et utilisés ensuite comme dalles, chambranles de cheminées, montants de portes et fenêtres, etc. Mais, à une certaine profondeur, l'asphalte, chargé de bitume libre qui suinte à travers ses pores, devient trop tendre et ne se laisse plus mordre à la scie; aussi l'exploite-t-on aujourd'hui pour la fabrication du mastic d'asphalte et de l'asphalte comprimé. Ce travail s'est fait longtemps par cavernes souterraines; aujourd'hui à ciel ouvert.

¹ On a voulu voir, dans les caprotines de l'urgonien, l'origine du bitume. Les parties bitumineuses du calcaire sont, au contraire, celles qui n'en contiennent pas.

² Voir COQUAND (B. S. G. F. 2^e série, t. 25, p. 420) et plus haut p. 566. — Les autres asphaltes italiens ont été étudiés page 565.

6° ASPHALTES DE RUSSIE (SYSRAN) ¹ ET DU TYROL

Sysran. — Comme nous l'avons dit plus haut, sur les rives de la Volga, près de la presqu'île de Samara, un petit îlot renfermant du calcaire carbonifère et du calcaire permien bréchiforme s'élève au milieu des terrains jurassiques et crétacés.

Vers le Sud-Ouest, ces divers calcaires présentent des imprégnations asphaltiques qu'on exploite depuis 1874, en particulier près de la ville de *Sysran*, le long de la *Sysranka* et de ses affluents. Les calcaires contiennent jusqu'à 30 p. 100 de bitume. Le bitume nécessaire pour la fabrication du mastic est, en outre, extrait de sable bitumineux voisins. Au Nord de la presqu'île de Samara, la matière bitumineuse a pénétré dans les sables du callovien inférieur.

Tyrol. — L'asphalte est connu dans le Tyrol sous le nom de *stinkstein* et les variétés moins riches en bitume y sont appelées *gallenstein*. Plusieurs gisements ont été signalés, au voisinage de l'Inn, dans le calcaire jurassique qui forme la rive gauche de cette rivière, en particulier à *Seelfeld*. On a fabriqué là du mastic d'asphalte en utilisant, comme bitume additionnel, le produit de la distillation du *stinkstein*.

En suivant le cours de l'Inn, on trouve également, un peu au-dessus de *Kufstein*, à *Hœring*, sur la rive droite, un calcaire tertiaire bitumineux.

VII. — GAZ NATURELS COMBUSTIBLES ²

Historique. — Les dégagements de carbures d'hydrogène combustibles sont, on le sait, fréquents dans les marais. Dans les mines de houille, ils constituent le grisou. On les retrouve dans les mines de sel ³. Enfin, dans certaines localités spéciales, ils se dégagent en grande abondance

¹ 1899. Congrès géol. de Saint-Petersbourg, t. 20, p. 22. — Voir plus haut p. 517.

² 1876. SMITH. *Puits de gaz en Pennsylvanie* (Ann. Ch. et Phys. (5), t. 8, p. 566. B. S. C. P., 1877, n° 3). — 1885. WHITE. *The geology of natural gas*. (Science, t. 5, p. 521. Cambridge (Mass)). — 1886. EDWARD ORTON. *The recently discovered Sources of natural gas and petroleum in North-Western Ohio* (Am. As. for the Adv. of Sc., 34^e meeting, p. 202). — ASHBURNER. *The geology of natural gas in Pennsylvania and New-York* (in-8° de 11 p.). — 1885-86-87. OBALSKI. *Rapports sur les gaz combustibles du Canada* (contient une bibliographie antérieure). — 1886. BANNISTER. *Something about natural gas* (New-York). — 1886. JOS WEEKS. *Natural gas* (Mineral resources of the Un.-States). — 1886. CHANCE. *The anticlinal theory of natural gas* (T. Am. I. M. E., t. 15, p. 3). — 1889. *Sur l'épuisement des gaz à Pittsburg* (la Nature, 28 déc.). — 1889. N.-H. WINCHELL. *Natural gas in Minnesota* (in-8°, carte). — 1894. M. KLITCKE. *Die Naturalgasgebiete von Ohio und Indiana* (Z. f. pr. G., p. 272). — 1898. DAWSON. *On the Discovery of natural gas in East Sussex* (Quart. Journ., t. 54, n° 215, p. 564-571). — 1898. HEWITT. *Natural gas at Heathfield station Sussex* (Quart. Journ., t. 54, n° 215, p. 572-574). — 1908. TASSART. *Exploitation du pétrole*, p. 284 à 291, p. 302. — 1911. *Mineral Industry for 1910*, pages 492 à 500.

³ Il est arrivé d'utiliser, pour l'éclairage ou le chauffage, les gaz des mines de sel, ou même le grisou (La Nature, 5 janv. 1910, n° 1912, suppl.), mais toujours en très petites proportions.

à travers une boue imprégnée de sel marin en produisant des volcans de boue ou salses (Apennins, Sicile, Caucase, Perse, Birmanie, etc.).

Ces faits étaient connus depuis fort longtemps et l'idée toute naturelle de tirer parti de ces gaz en les brûlant est également ancienne. C'est ainsi que les Chinois, dit-on, utilisent, depuis des siècles, des gaz naturels dans la province du Se-tchouan. Mais la véritable application industrielle des gaz hydrocarbonés date de 1821 et a été faite en Amérique.

C'est en 1821 que la ville de Fredonia (N-Y) commença à s'éclairer au gaz naturel; en 1830, on employa ce gaz dans un phare à Barcelona sur le lac Erié: en 1841, on en chauffa des chaudières dans la vallée de Kanawah (West-Virginia); en 1874, on s'en servit à Leechburg dans une usine à fer; en 1883, on établit une canalisation de Murrayville à Pittsburg sur 25 km. et, dans la ville de Pittsburg, les gaz furent partout substitués aux combustibles.

Le champ de gaz de Findlay (Ohio) fut trouvé peu après, de 1884 à 1888. On fit alors un forage fameux, le forage Karg, où les jets de gaz soulevèrent les outils et produisirent 336 000 m³ de gaz en vingt-quatre heures, avec un jet de gaz que l'on entendait à 5 km. et voyait la nuit à plus de 60 km.

Ce fut alors une ère de prospérité remarquable et, en même temps, de gaspillage à l'américaine, pour cette industrie. On multiplia les sondages de tous côtés. En 1887, il y avait, dans la Pennsylvanie occidentale, 66 compagnies de gaz naturel représentant un capital de 110 millions et fournissant une quantité de gaz qui remplaçait 25 000 t. de charbon par jour. Dans le seul district de Pittsburg, on consommait, par vingt-quatre heures, 30 000 000 m³ de gaz remplaçant 20 000 t. de charbon, économisant 5 000 ouvriers et fournissant aux besoins de 30 000 compagnies ou particuliers. Il y avait, dès ce moment, 200 puits exploités. Pour attirer les industriels, on offrait souvent le gaz gratuitement pendant cinq ans, comme s'il eût été inépuisable.

Mais les exploitations de gaz combustibles sont, au contraire, très précaires. Les réservoirs intérieurs sont limités et, comme nous le montrerons bientôt par des chiffres, la pression, qui les fait s'épancher au dehors, baisse très vite.

En Pennsylvanie, dès 1888, la production commença à baisser fortement et cette baisse s'accrut jusqu'en 1896, époque où de nouveaux districts (Armstrong et Clarion), entrant en valeur, commencèrent à la faire remonter peu à peu, jusqu'à son chiffre de 1888, atteint de nouveau en 1905 et seulement maintenu depuis lors.

En dehors de la Pennsylvanie, cette industrie a aujourd'hui, dans l'ensemble des Etats-Unis, une importance représentée par le chiffre de 315 millions de francs (contre 210 en 1905), auquel monte environ sa production annuelle. Elle existe également au Canada. Mais l'Amérique du Nord est le seul continent, où, jusqu'ici, elle soit réellement organisée.

Statistique. — La statistique de 1909, montre, pour les Etats-Unis, une production totale d'environ 16 milliards de mètres cubes (contre 7 en 1905): le tout vendu en moyenne 2,5 à 3 centimes le mètre cube: d'où le chiffre de 315 millions de francs donné plus haut, auquel contri-

buent : la Pennsylvanie pour 100, la Virginie occidentale pour 85 (50 en 1905), avec une production de gaz supérieure à celle de Pennsylvanie mais de moindre valeur, l'Ohio pour 50 (29 en 1905), le Kansas pour 41, l'Oklahoma pour 9, l'Indiana pour 8, etc.

Propriétés chimiques et physiques.— La moyenne des gaz combustibles de Pennsylvanie et West-Virginia donne 81 p. 100 de méthane contre 93 p. 100 dans l'Ohio et le Kansas, 95 p. 100 dans la Louisiane. En revanche, les autres hydrocarbures, qui interviennent pour 14 p. 100 en Pennsylvanie, tombent à peu près à zéro dans les autres provinces. La teneur en hydrogène libre, parfois nulle, dépasse ailleurs 1 p. 100. Les pétroles sulfureux s'accompagnent, dans les gaz, d'un peu d'hydrogène sulfuré.

Le pouvoir calorifique au mètre cube est de 9 800 à 10 200 calories.

Industrie. — Les gaz sont captés sur les forages, puis amenés par des conduites, comme celles qui servent au gaz d'éclairage¹ et utilisés pour l'éclairage et le chauffage domestique, la production de la vapeur, les verreries, les usines à fer, etc.

En 1905, il y avait, en Pennsylvanie, 7 000 forages productifs et, dans l'année, on en avait foré 765 productifs contre 430 secs ou abandonnés.

Le gaz, à la sortie du puits, traverse des réservoirs en fer, où il abandonne les matières entraînées. Puis il est conduit au point de destination. Les tuyaux servant au transport sont en fer, éprouvés à une pression de 80 à 100 atmosphères ; ils sont vissés entre eux et réunis par un joint spécial ; leur diamètre est de 0,08 m. à 0,35 m. pour les hautes pressions et va jusqu'à 0,75 m. pour les basses pressions. Les lignes de distribution ont généralement 0,10 m. On emploie, dans les villes, des régulateurs de pression permettant de distribuer le gaz à des pressions différentes. Le gaz employé pour le chauffage d'une maison, par exemple, a besoin d'une moindre pression que celui d'une usine à fer consommant plusieurs centaines de mètres cubes par jour.

Généralités géologiques. — L'existence des gaz combustibles est si intimement liée à celle des pétroles, qu'il suffit, pour l'ensemble de leur géologie, de renvoyer à l'étude faite précédemment. Les gaz dégagés contribuent pour beaucoup au mouvement ascensionnel des huiles suivant les fractures naturelles des terrains ou dans les sondages industriels. Les dégagements de gaz à la surface sont, par suite, avec les dépôts bitumineux et asphaltiques, un des indices les plus sûrs qui puissent diriger dans les recherches de pétrole en profondeur. Il ne faut toutefois pas s'y fier entièrement, et l'on trouve souvent des gaz abondants, sans que la proportion d'huile minérale rencontrée soit corrélative ; il arrive inversement de rencontrer du pétrole profond peu chargé de gaz.

Tantôt le gaz se trouve au-dessus du pétrole, tantôt au-dessous. Il n'y a aucune règle fixe à cet égard. De même, on ne voit pas la raison générale pour laquelle tel district pétrolifère et, dans ce district, tel ou tel champ est plus ou moins riche en gaz. Indépendamment de la nature

¹ Les conduites en Pennsylvanie ont 19.400 km. de long ; en Virginie occidentale, 6.400.

du pétrole, cela dépend évidemment de la forme et de la capacité des vides souterrains, où ces gaz peuvent s'accumuler. Des calcaires crevasés, comme ceux de l'Ohio, semblent cependant une condition favorable.

L'exploitation industrielle d'un district pétrolifère, en multipliant les événements par lesquels s'échappent les gaz, contribue pour beaucoup à diminuer la force ascensionnelle de l'huile dans les trous de sonde et à amener le tarissement. On a quelquefois été jusqu'à soutenir que cet épuisement des gaz était la seule cause de la stérilisation progressive des champs pétrolifères et qu'il y existait encore de l'huile en profondeur, mais incapable de s'élever. Cette assertion paraît inexacte. Néanmoins, on peut prouver, par des chiffres précis, l'influence des sondages sur la pression interne. Au Kansas, dans le champ d'Iola, on a trouvé, en 1895, un puits donnant 283 000 m³ de gaz par vingt-quatre heures. Le champ de gaz, qui est un des plus riches connus, s'étend là sur 16 km de long et 8 km de large. La pression d'un puits, qui était de 19 kg. par centimètre carré en septembre 1900, était de 10 kg en décembre 1901, de 6 kg en 1902, de 4 kg en août 1902; et tous les puits ont donné des baisses semblables. On a, dans ce champ, tracé une carte donnant les courbes d'égale pression, sur laquelle on voit la pression baisser de l'Ouest à l'Est (14 à 24 kg. à l'Ouest contre 10 à 14 kg. à l'Est), et les lignes d'égale pression, à peu près Nord-Sud, sont presque conformes aux affleurements des terrains géologiques¹.

Districts Nord-Américains. — La Pennsylvanie, la Virginie occidentale et l'Ohio ont été les plus anciens centres de production de gaz. A Findlay, dans l'Ohio, un district, qui est maintenant tout à fait épuisé, a eu un moment de richesse extrême vers 1885; ces gaz se trouvaient dans le calcaire de Trenton. Dans le centre de l'Ohio, c'est encore un calcaire, celui de Clinton, qui fournit les gaz. Le champ de l'Indiana porte également sur une suite du calcaire de Trenton. Ce dernier comptait, en 1905, 4 000 puits en activité.

Cependant cette relation des gaz avec les calcaires fissurés n'est nullement générale. Dans l'Illinois, à Greenville, on trouve les gaz dans les sables à 300 m. de profondeur. Dans l'Ohio, la plupart des gaz proviennent de ce qu'on appelle le sable de Clinton. Le champ du Kansas, qui comprend environ 1 300 forages productifs, porte sur les grès et sables des schistes Cherokee à la base du carbonifère. En Louisiane, à Caddo, on a trouvé, en 1905, de grandes quantités de gaz dans des sables tertiaires. Un puits, foré à ce moment, donna un jet de gaz de 10 m. de haut et 10 m. de diamètre, qui brûlait au-dessus d'un étang, traversé par ce jet et couvert de vagues.

Au Canada, une exploitation assez importante a existé autrefois dans l'Ontario et ses gaz alimentent encore la ville d'Ontario; mais la décroissance a été rapide.

Cependant le Canada donne encore pour environ 600 000 fr. de gaz naturels par an, provenant presque totalement de l'Ontario.

¹ TASSART, *loc cit.*, p. 191.

Transylvanie. — En 1909, on a trouvé des sources de gaz méthane en Transylvanie, à 300 km. des pétroles galiciens et en relation probable avec les gisements salins si développés dans cette région ¹.

La découverte a eu lieu près de *Kissarmas*, à une cinquantaine de kilomètres de Kolozsvár.

En 1909, un forage de 300 m., destiné d'abord à rechercher des sels de potasse, trouva le premier jaillissement de gaz abondant. Les dégagements avaient commencé dès 150 m. de profondeur. Ils s'accrurent en poursuivant et l'on a publié, à leur sujet, des chiffres de rendement journaliers très considérables. Non loin de là, à *Szazresen*, on a trouvé également, à 232 m., du gaz inflammable.

On a parlé aussitôt très ambitieusement d'éclairer Buda-Pest, à 400 km., d'alimenter l'industrie transylvanienne, de créer une usine de nitrates à Marosvasarhely en l'alimentant au gaz, etc.

Russie. — Les gaz naturels sont connus depuis longtemps en Russie ; mais certaines difficultés d'application ont fait longtemps négliger leur emploi. Depuis que le pétrole du Caucasse s'épuise, on a commencé à utiliser les gaz de Grosny et de Surakhany.

¹ La Nature, 7 juillet 1914, suppl. — Voir plus haut, tome 1, p. 558.

CHAPITRE XVIII

BORE¹

B = 11.

I. — USAGES ET STATISTIQUE

Usages. — Le bore est utilisé sous deux formes : acide borique et borax ou borate de sodium.

L'*acide borique* sert, en dissolution étendue d'acide sulfurique, pour imprégner les mèches des bougies stéariques de manière à en fondre les cendres et à les volatiliser. On l'emploie dans la préparation de la crème de tartre soluble et dans la fabrication du vert de chrome Guignet. Son emploi comme antiseptique lui assure également un débouché.

Le *borax*, ou borate de sodium, se trouve dans le commerce à deux états d'hydratation différents : le borax ordinaire $2B^2O^3, Na^2O, 10H^2O$, contenant 47,2 p. 100 d'eau et le borax octaédrique $2B^2O^3, Na^2O, 5H^2O$, qui n'en contient que 30,8 ; le premier obtenu par cristallisation à la température ordinaire, le second au-dessus de 60.

Les usages du borax sont fondés sur sa propriété de dissoudre des oxydes. C'est ainsi que, pour faire une soudure métallique, on saupoudre de borax en poudre les pièces à souder et on les porte au rouge. Le borax,

¹ 1854. SENEVIER. *Sur les cond. éconóm. de l'ind. de l'acide borique* (Ann. d. M., 5^e sér., t. 7, p. 625). — 1874. Annales des mines, Revue de géologie, 7^e série, t. 7, p. 74; *ibid.*, p. 102 (borates du Tibet). — 1877. DIEULAFAIT. (Ann. de chimie et de physique, 5^e sér., t. 12). — 1878. D'ACHIARDI. *Sull'origine dell' acido borico e dei borati* (Pise, Società toscana, t. 3, p. 252; proc. verb., t. 28, traduit dans Zeits. der D. geol. Ges., t. 30, p. 148). — 1878. DURWELL. *Présence de l'acide borique dans l'eau des lacs salés d'Algérie* (Bul. Soc. Chim., t. 29, p. 481). — 1880. KLEIN. *Ueber den Boracit* (N. J. f. Min. Geol. und Pal., n^os 2 et 3 du t. 2, p. 200. Stuttgart). — 1882. DIEULAFAIT. *Sur l'acide borique dans l'eau de mer* (R. Sc., 8 juillet 1882, p. 37 et 19 mai 1883). — 1882. DIEULAFAIT. *L'acide borique dans les lacs salés et les eaux salines naturelles* (Ann. Chim. et Phys., 5^e s., t. 25, p. 145). — 1883. *Distrib. gén. du borax* (31^h. ann. report of the California State. min.). — 1885. DIEULAFAIT. *Nouvelle contribution à la question de l'origine de l'acide borique* (C. R., t. 100, p. 1240). — 1891. FLEMING. *Sources et applications du borax* (Journ. of the Soc. of arts, 8 mai). — 1893. KEMP. (Stat. de l'Engineering, p. 43 à 47). — 1898. *Borax du Pérou* (Z. f. pr. G., p. 341). — 1899. BERGEAT. *Die frühere Borsäure Gew. auf Vulcano* (Z. f. pr. G., p. 45). — 1902. VERNADSKY et POPOFF. *Ueber den Boraxgehalt von Eruptionen Producten aus dem Salsengebiet von Kertsch und Taman* (Z. f. pr. G., p. 79 à 81). — 1902. DENNIS. *Borax du Sud Orégon* (Z. f. pr. G., p. 244). — 1903. J. STRUTHERS. (Min. Ind., p. 70). — 1911. WEINTRAUB, *Prop. et prépar. du bore* (Chemical News, 29 sept.). — *Mineral industry for 1910*, p. 86 et 87.

ayant pour effet de décaper la surface des deux métaux, permet à la soudure de prendre. Les usines où l'on travaille les métaux sont, par suite, les plus anciens et les plus importants consommateurs de borax.

Depuis 1850 environ, mais surtout depuis 1880, on a commencé également à utiliser le borax en proportion notable dans la verrerie, la poterie et les arts céramiques. Le borax entre dans la composition des strass¹, des émaux, des faïences et des grès, dans celle des couleurs sur verre ou sur porcelaine, dans l'émaillage de la fonte, de l'acier et du cuivre. A Clichy, on prépare des borosilicates de potassium et de zinc pour former un cristal remarquable par sa limpidité et sa blancheur. Employé dans les couvertes de faïences, l'acide borique abaisse beaucoup leur coefficient de dilatation et, en permettant de l'équilibrer avec celui de la pâte, empêche les craquelures.

On en consomme encore pour la conservation des aliments, pour certains savons, cosmétiques, etc. Un peu de borate de manganèse sert comme siccatif. On a enfin indiqué le borate d'ammoniaque comme susceptible de rendre les cotons incombustibles.

Enfin les fabricants de coffre-forts mélangent du borax à la terre réfractaire pour le revêtement des coffres incombustibles. Ce sel, qui contient 47 p. 100 d'eau de cristallisation, le dégage, en effet, en cas d'incendie et empêche les papiers de brûler.

Statistique. — La production du borax dans le monde s'est beaucoup accrue à la suite de l'essor de l'industrie métallurgique.

Vers 1840, 1 000 t. suffisaient par an à tous les marchés ; en 1854, on en consommait environ 2 000 t., dont 1 300 t. provenant de la Toscane, où cette industrie date de 1827 et 700 t. de l'Inde.

A ce moment, les Anglais avaient le monopole de la production de Toscane et, en achetant à tout prix la production de l'Inde, étaient maîtres du marché. Le borax se vendait à Liverpool un prix uniforme de 2 250 fr. la tonne.

Vers 1878, la découverte des borates de Californie, puis la mise en exploitation de ceux du Pérou, amenèrent une baisse, qui s'est accentuée progressivement avec un déplacement des centres de production. L'acide borique brut tomba d'abord à 1 000 fr. la tonne, puis à 800 fr. en 1883, 380 fr. en 1901, enfin 320 fr. à 350 fr. de 1902 à 1905 et 400 fr. en 1911. C'est l'Angleterre, qui réglemente toujours le marché et qui a déterminé la hausse des dernières années.

Actuellement, on produit dans le monde environ 90 000 t. de borax par an², consommés : pour 40 000 t. par les Etats-Unis, pour 50 000 par l'Europe².

Les principaux pays fournissant l'acide borique sous une forme et sous une autre sont : la Californie qui a donné : en 1903, 34 000 t. de borate de chaux (colemanite) ; en 1907, 54 000 ; en 1908, 22 600 ; en 1909, 17 000 ; en 1910, 37 000 ; puis le Chili, 32 000 t. de borate de chaux en 1909 ; la

¹ Pour le strass, on mélange le borax avec du silice, de la potasse, du blanc de céruse et une matière colorante.

² Les prix de détail sont en 1911 : pour la boracite 0,80 fr. le kg ; pour le borax, 0,70 fr. ; pour l'acide borique cristallisé 0,90 fr.

région de Sultan Tchair en Asie Mineure (10 à 12 000 t. de borate de chaux ou pandermite) ; la Toscane, qui fournit encore environ 2 500 t. d'acide borique brut : la Bolivie (300 t. de borate de chaux). Il sort, en outre, à peu près 200 t. de borax de l'Inde et presque autant de boracite (chloroborate de magnésium) du gisement de potasse de Stassfurt en Allemagne (149 t. en 1989).

Nous ajouterons quelques détails sur ces statistiques en traitant l'industrie des divers pays.

II. — GÉOLOGIE DU BORE

Minerais. — L'acide borique existe en dissolution dans certaines eaux chaudes, telles que les *soffioni* de Toscane et peut également se présenter cristallisé en *sassoline*. Il forme alors l'acide orthoborique, ou acide borique ordinaire, BO_3H^3 ($\text{B}^3\text{O}^3, 3\text{H}^2\text{O}$), qui contient 17,73 p. 100 de bore¹.

On rencontre, comme sels, le borate de sodium ou *tinkal* de Californie et du Tibet, $\text{B}^3\text{O}^7 \text{Na}^2 + 10\text{H}^2\text{O}$, à 83,5 p. 100 d'acide borique ; le borate de calcium, ou *colemantite* de Californie, ou *pricéite* : $\text{B}^3\text{O}^{10}\text{H}^{10}\text{Ca}^2$; l'*hayésine* $\text{B}^3\text{O}^{13}\text{H}^{13}\text{Ca}$; le borate de calcium hydraté ou *pandermite* à 50 p. 100 ; des *boronatro-calcites*, tels que l'*uléxite* au Pérou, au Chili et en Bolivie : $\text{B}^3\text{O}^7\text{Na}^2 + 2(\text{B}^3\text{O}^7\text{Ca}) + 18\text{H}^2\text{O}$, et enfin un chloroborate de magnésium, la *boracite* de Stassfurt : $4(\text{B}^3\text{O}^7\text{Mg}) + \text{MgCl}_2, 2\text{MgO}$.

Mais, parmi les minéraux boratés, il faut, en outre, faire une place à des silicates, dans lesquels le bore, tout en n'intervenant que comme accessoire, est néanmoins un élément constant : comme la tourmaline, la danburite, l'axinite.

Ces minéraux sont intéressants à signaler comme mettant en évidence, d'une façon incontestable, l'existence de bore interne, qui resterait discutable dans les gisements de bore proprement dits.

Leur dissémination fait que le bore, englobé sous cette forme dans l'écorce terrestre, doit arriver localement à des chiffres sensibles, bien que la teneur moyenne dans l'écorce soit peut-être à peine d'un millionième.

Les *tourmalines*, qui sont des borosilicates fluorifères d'alumine et de diverses bases contiennent 7 à 9 p. 100 d'anhydride borique, soit environ 2 à 3 p. 100. de bore. La *Danburite*, isomorphe avec la topaze, est également boratée.

L'*axinite* tient de 4,5 à 6,6 d'anhydride borique.

Rôle naturel du bore. — On avait autrefois admis, entre le bore et le carbone ou le silicium, certaines analogies, que les recherches ultérieures de la chimie n'ont pas confirmées. Il a été prouvé, par exemple, que le bore amorphe et le bore adamantin de Sainte-Claire Deville et Wöhler, assimilés jadis au graphite et au diamant, étaient des composés. Tandis que le carbone et le silicium sont tétravalents, le bore est trivalent, etc. En géologie, le rôle du bore tend à le rapprocher des métalloïdes actifs, comme le chlore, le fluor, le soufre, l'arsenic.

Conformément à son faible poids atomique, sa place naturelle semble être à la périphérie terrestre. Cela n'empêche pas qu'il n'en existe une

¹ L'anhydride borique B^3O^3 renferme 31,43 p. 100 de bore.

certaine proportion emprisonnée dans l'écorce. Mais, comme il arrive pour tous les éléments dont la place est périphérique, le bore emprisonné tend sans cesse à se dégager vers le dehors et l'on doit supposer que sa proportion à la surface de la Terre augmente constamment : les phénomènes qui peuvent en ramener vers l'intérieur jouant un rôle insinifiant auprès de ceux qui en dégagent.

Le bore joue un rôle important dans les tumerolles des granites. Ceux-ci s'entourent fréquemment, comme nous allons le voir, d'une auréole à tourmaline.

Les soffioni, s'ils ne sont pas un simple effet de remise en mouvement sur des gites sédimentaires, sont peut-être assimilables à une manifestation actuelle du même phénomène.

Le bore, disséminé en traces inappréciables dans le sol, passe dans la vie végétale, où il intervient d'une manière à peu près constante. Ainsi les cendres de presque tous les fruits tiennent au moins 1 à 2 millièmes d'acide borique¹.

Ce bore peut alors passer dans les eaux et se concentrer dans leurs produits d'évaporation partout où il y a un climat désertique. Dans les environs de Biskra, Dieulafait a montré que l'on pouvait reconnaître le bore au spectroscope sur moins d'un centimètre cube d'eau.

Enfin, si le climat ne détermine pas leur concentration immédiate, ces composés du bore, une fois entrés en dissolution, arrivent en petites quantités dans la mer et se rassemblent dans les produits d'évaporation des eaux (gisements d'évaporation remontant à une époque géologique ancienne en Asie Mineure, ou de formation actuelle en Californie).

Nous allons donc avoir à étudier comme gisements de bore :

1° Le bore en inclusions dans les roches cristallines (tourmaline, etc.).

2° Le bore en fumerolles hydrothermales d'origine problématique (Soffioni de Toscane).

3° Le bore en produits d'évaporation lagunaires dans les sels sodiques et potassiques du permien de Stassfurt, dans les gypses éocènes d'Asie Mineure, dans les bassins salins actuels de Californie, du Tibet et du Pérou².

1° INCLUSIONS DU BORE, TOURMALINE, AXINITE, ETC.

Les auréoles des granites à mica blanc présentent fréquemment des stockwerks de pegmatite, et, dans le granite même, des zones surchargées de feldspaths à gros éléments, dans lesquelles la tourmaline se développe comme élément constituant.

A la tourmaline s'associe parfois l'axinite avec le grenat ou avec le quartz. La présence du bore est, dans tous ces cas, liée à celle de roches

¹ 1895. C. R. t. 121, p. 896.

² On peut remarquer que les sels boriques, assez faciles à reconnaître lorsqu'on en soupçonne la présence, notamment par leur fusibilité, ne frappent pas la vue d'une manière spéciale. Par exemple, la colemanite de Californie ressemble à du gypse. Aussi un grand nombre de gisements doivent-ils encore passer inaperçus, d'autant plus que les régions où on les rencontre sont souvent désertiques.

acides qui ont dû être particulièrement riches en fumerolles de tous genres.

On a, d'autre part, remarqué, dans un certain nombre de gisements, un rapport apparent entre des eaux boratées et des ophites ou serpentines (à Tarasp et Saint-Moritz en Suisse, dans les Pyrénées, sur les bords du lac d'Ourmiah, etc.)¹. Avant d'en tirer une conclusion, il y aurait lieu d'examiner, dans chacun de ces exemples, si la présence du bore n'est pas simplement liée aux produits gypso-salins que l'on trouve si fréquemment sur des anticlinaux ayant donné lieu à des intrusions d'ophites.

2° SOFFIONI DE TOSCANE¹

Gisements. — Les soffioni de Toscane, décrits dans tous les cours de chimie, se trouvent au Sud de Volterra, entre cette ville et Massa Marittima, dans la région de Larderello et de Monterotondo, etc., sur environ 40 km. de long et 10 km. de large.

Leur caractère très spécial laisse dans le doute sur leur origine réelle et l'on peut hésiter entre l'idée de fumerolles volcaniques (décomposition par l'eau d'un sulfure de bore profond, suivant l'ancienne théorie de Dumas), ou l'hypothèse d'une remise en mouvement appliquée à un gisement d'évaporation, tel que ceux étudiés plus loin².

Il y a, dans cette région, en rapport avec des failles, plusieurs alignements Nord-Sud, sur lesquels les soffioni sont localisés, et leur relation avec des cassures profondes, qui apparaît déjà par leur position ordinaire sur des contacts par faille entre terrains hétérogènes, est également mise en évidence par la façon dont ces jets de vapeur se produisent le long d'une semblable ligne, à des altitudes différentes, indépendamment du profil orographique et de la pression hydrostatique qui en résulte (fig. 92).

Une première ligne de soffioni part de Larderello, aux environs de Monte Cerboli, passe au Bagno al Morbo et atteint Castelnuovo di Val di Cecina; une seconde est celle du Sasso et du Monte Rotondo; une troisième passe à Serrazzano, Lustignano et Lagoni Rossi. De tous les côtés, dans ce pays, il sort du sol des jets de gaz naturels à haute pression, qui ont donné l'idée d'une exploitation industrielle, où l'on va,

¹ Nous avons signalé, p. 552, un rapprochement analogue pour divers hydrocarbures.

² Gisement visité en 1904. — Coll. Ec. d. M., 2871. — Voir feuille au 1/100.000^e de Massa Marittima. — 1870. FOUQUÉ et GORCEIX. *Sources de gaz des Apennins et lagoni de la Toscane* (Ann. Sc. géol., t. 2, p. 88 à 94). — 1890. L. PERREAU. *Orig. et Coll. dell' acido borico in Toscana* (Ann. Soc. Ing. e. Arch. it., t. 5, p. 3). — 1896. DE STEFANI. *I Soffioni boraciferi della Toscana* (Mem. Soc. géogr. ital., p. 410 à 435). — 1899. L. DE LAUNAY. *Sources thermo-minérales*, p. 36. — 1900. LOTTI. *Soffioni boraciferi della Toscana* (Rassegna miner. t. 12, Turin). — D'ACHIARDI. *Acido borico e borati dei Soffioni*. — 1905. L. DE LAUNAY. *Les Soffioni* (La Nature, 26 août, n° 1683 et 1906, la *Métallogénie de l'Italie*, p. 134). — 1906. R. NASINI. *I soffioni boraciferi*. Roma. — 1907. D'ACHIARDI. *Consid. crit. sulla origine dell' acido borico nei soffioni boraciferi* (Mem. Soc. Tosc., t. 28). — 1910. B. LOTTI. *Geologia della Toscana*, p. 427; *Sulla prov. dell' acido borico nei soffioni*, etc. (Rass. min., t. 26, p. 14).

³ On a également soutenu (Nasini) que l'acide borique provenait des serpentines, où il en existe souvent des traces, et (Perrone) qu'il était emprunté à la tourmaline des granites. Ces hypothèses ne semblent pas pouvoir expliquer l'ensemble des phénomènes.

comme nous allons le dire, chercher artificiellement ces veines hydrothermales profondes, par des sondages descendus jusqu'à 120 m. On atteint ainsi des vapeurs allant de 100 à 175 degrés, et, par conséquent, à haute pression (jusqu'à 6 atmosphères), qui jaillissent avec une intensité extraordinaire.

En même temps, leur radioactivité est forte, puisque le seul soffioni de Venella, près Larderello, donne autant d'émanation, qu'en pourrait dégager un demi-gramme de radium dans le même temps.

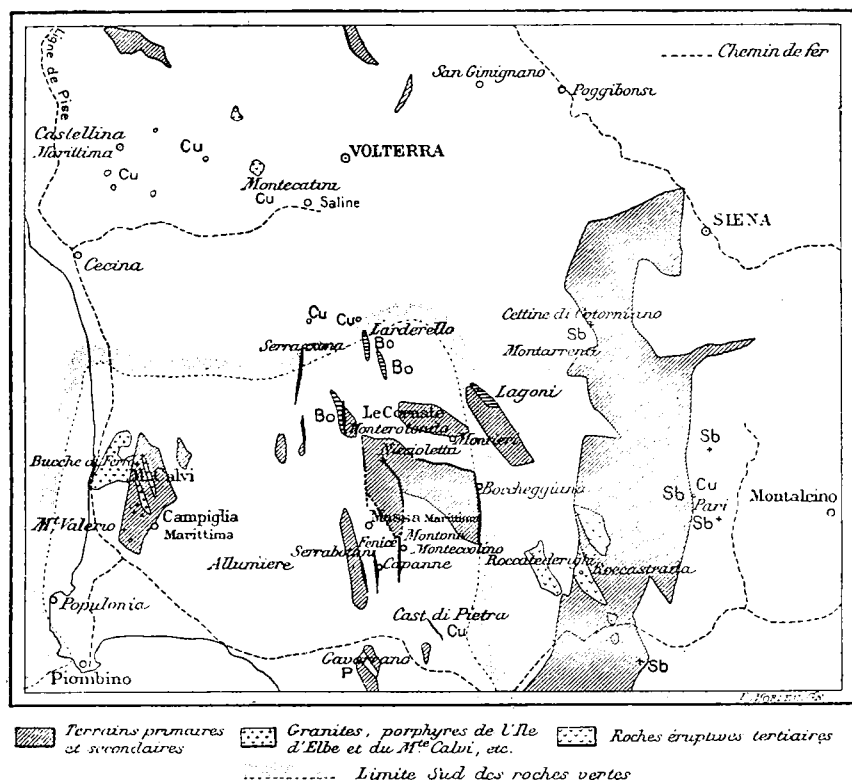


Fig. 92. -- Carte des gisements minéraux et des soffioni de la Toscane montrant leur relation avec les failles limites des massifs anciens¹.

Dans la minéralisation de ces eaux entre une assez forte proportion de sulfates et un peu d'acide borique, avec de l'hydrogène sulfuré, de l'acide carbonique et des traces d'hydrogène libre. La proportion d'acide borique, contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, est très faible. Quand on a fait barboter un jour les dégagements gazeux dans les bassins des *lagoni*, l'eau de ceux-ci atteint encore à peine 1 p. 100 d'acide borique.

D'où viennent ces substances ? L'idée la plus simple est, sans doute, de leur attribuer une origine analogue à celle des sels minéraux contenus dans la plupart des eaux minérales : lessivage des matières rencontrées

¹ La figure 519 au tome 2 montre plus en détail la région de Massa Marittima.

dans leur trajet souterrain. A cet égard, il existe un rapprochement géographique très intéressant entre les soffioni et la formation sulfo-gypseuse, qui fournit près de là les sels, les gypses, les albâtres de Volterre. Nous allons trouver, en effet, les borates d'Asie Mineure associés à des gypses et ceux de Stassfurt avec des produits salins.

Cependant un certain nombre d'observations peuvent être invoquées en faveur d'une activité volcanique profonde, de fumerolles directement dégagées par une sorte de solfatare. Ce sont l'aspect volcanique du phénomène, le faible degré géothermique que laisse, en tout cas, supposer cette haute température de la vapeur; enfin et surtout la position des soffioni dans un district très localisé, entouré de manifestations volcaniques, sur le même système de fractures qui, plus au Sud, conduit aux intrusions éruptives récentes et qui, plus au Nord, se trouve encore jalonné par les imprégnation cinabriques de Jano et Ripa (cinabre en relation si fréquente avec l'éruptivité).

Quoi qu'il en soit, le rôle des contacts par faille est ici, comme pour les filons métallifères de la région, très nettement manifeste. Par exemple entre Sasso et Monte Rotondo, la zone des lagoni s'intercale entre l'éocène et le trias. Sur le prolongement Sud de cette zone, une source chaude, dans la mine de pyrite de Boccheggiano, renferme des traces d'acide borique. Sur le prolongement Nord, on a trouvé, à Monte Catini, loin des travaux de la mine de cuivre et en plein calcaire, d'abondants dégagements hydrocarburés, également accompagnés de traces de bore (fig. 92).

On peut remarquer, à ce propos, qu'on a reconnu récemment la présence d'un peu de bore dans les volcans de boue de la région de Kertch et de Taman, où les anciennes analyses n'en avaient jamais signalé: soit par erreur, soit par suite d'une modification possible dans le trajet des eaux souterraines qui produisent ces salses¹.

Industrie. — Le principal centre industriel est celui de Larderello, très atteint depuis quelques années par la concurrence des autres pays.

Au début, les dégagements gazeux des soffioni y étaient naturels. On va aujourd'hui chercher en profondeur les fissures hydrothermales par des sondages qui atteignent 120 m. Les sources obtenues sont de deux catégories. Il y a ce qu'on appelle les soufflards secs, où la vapeur d'eau sous pression monte si vite qu'elle n'a pas le temps de se condenser et n'entraîne pas d'eau; on est alors obligé de faire barboter ces gaz dans des bassins que l'on remplit avec l'eau d'un torrent voisin. Les sondages heureux sont ceux qui donnent, au contraire, avec la vapeur et le gaz, de l'eau venant probablement, pour la plus grande partie, des terrains superficiels, en sorte que l'acide borique arrive déjà sous la forme d'une dissolution qu'il suffit de concentrer. D'une façon générale, les soffioni durent peu de temps, quelques semaines ou quelques mois au plus, puis s'obstruent et s'épuisent.

Le traitement consiste ensuite dans une concentration, une éva-

¹ VERNADSKI et POPOFF. *Ueber den Boraxgehalt von Eruptionsproducten aus den Salzengebiet von Kertsch und Taman* (Z. f. pr. G., p. 79).

poration et un raffinage. Les produits sont l'acide borique, le borate de soude et le sulfate d'ammoniaque.

En 1902, 12 exploitations toscanes donnaient 2 763 t. d'acide borique brut valant (à raison de 320 fr. la tonne) 884 000 fr. Le borax raffiné valait alors 400 fr. et l'acide borique 500 fr.

En 1908, il a été produit 2 520 t. d'acide borique brut avec lesquelles on a fabriqué 429 t. d'acide borique raffiné (à 525 fr.), 1 024 t. de borax (à 370 fr. la tonne); 438 t. de sulfate d'ammoniaque à 300 fr.

En 1910, on a eu 2 502 t. d'acide borique brut à 360 fr., ayant donné 695 t. d'acide borique raffiné à 520 fr., 912 t. de borax à 390 fr.

Cette même année, l'Italie a exporté 893 t. d'acide borique brut, 460 t. d'acide borique raffiné, et importé 180 t. de borate de soude.

3° a) SELS BORATÉS PERMIENS DE STASSFURT

Nous ne nous étendrons pas sur les gisements de Stassfurt, qui doivent être étudiés plus loin au chapitre du potassium. Mais il faut les mentionner ici à leur place dans la série, comme un exemple net d'évaporation saline ayant amené, à l'époque permienne, la concentration du borax. Il y a là de grandes masses de sel gemme, recouvertes par des sels potassiques (polyhalite, kiesérite, carnallite). A la partie supérieure du sel gemme on trouve déjà, en aiguilles assez rares, de l'hydroboracite (borate de calcium et de magnésium); mais le borate un peu abondant ne se trouve que dans les derniers produits d'évaporation avec la carnallite sous forme de stassfurtite (sel double de borate de calcium et de chlorure de magnésium). On extrait de là des boules de strassfurtite, ayant jusqu'à 0, 25 m. de diamètre et pesant jusqu'à 10 kg. La production de 1909 a été de 149 t. Il existe, en outre, vers le sommet de la carnallite, de petites couches très minces de strassfurtite. Le borate provient donc ici d'une concentration des eaux de la mer poussée jusqu'à ses dernières limites. On sait, en effet, que la mer en renferme toujours des traces ¹.

3° b) BORATES ASIATIQUES (SULTAN TCHAIR, OURMIAH, ETC.)

Sultan Tchair². — Ce gisement, dont nous avons vu l'importance industrielle, présente également le borate de calcium comme un produit d'évaporation lagunaire, associé cette fois, non plus aux derniers produits de concentration saline, mais, au contraire, au premier de tous, au gypse. Le bassin de dépôt étant encaissé dans les roches volcaniques, on peut supposer que ces roches se sont trouvées particulièrement riches

¹ Voir BISCHOF (Ann. de Chim. et Phys., 4^e sér., t. 5). — 1882, DIEULAFIT (Ann. de Chim. et Phys., t. 25, p. 153); — VAN-T HOFF, *loc. cit.*

² Coll. Ec. d. M., 1638. — 1877. G.-V. RATH. *Ueber Pandermit* (Ges. f. Naturk. zu Bonn). — 1878. COQUAND. *Note géologique sur les environs de Panderma* (B. S. Gr. F.). — 1894. D'ACHIARDI. *Roccie eruttive del bacino boratifero di Sultan Tchair* (Proc. verb. d. Soc. toscane Sc. naturali, 16 p.). — D'ACHIARDI. *Sul bacino boratifero di Sultan Tchair* (*ibid.*, 15 p.). — 1901. WEISS. *Lagerstätten im westlichen Anatolien* (Z. f. p. G., p. 256). — SUSS. *Loc. cit.*, t. 1, p. 428. — 1911. P. COULBEAUX, *Etude sur les gisements de borate de chaux de l'Asie Mineure* (inédit).

en bore : peut-être même des fumerolles boriques ont-elles pu se dégager pendant la concentration lagunaire. Si on laisse de côté cette dernière hypothèse, on se représenterait le phénomène, qui date ici de l'éocène, analogue à ce que nous verrons se produire sous nos yeux dans la zone californienne, où les conditions semblent très analogues, avec intervention possible de sources chaudes liées au volcanisme.

Au Sud de Pañderma, le bassin de Sultan-Tchhair peut avoir 6 à 8 km. de long et autant de large. On le décrit comme encaissé entre des collines de gabbro, granite et schistes anciens. D'après des échantillons provenant de l'ancienne mine Azizié, qui m'ont été autrefois communiqués par P. Coulbeaux, il faut y ajouter des andésites amphiboliques à hornblende et mica noir, avec tufs des mêmes roches.

Dans ce bassin se sont accumulés des dépôts sédimentaires, dont la partie supérieure au moins appartient au tertiaire et contient les gisements de borates. Le toit est formé, sur 80 m. d'épaisseur, d'abord par des grès et schistes miocènes avec conglomérat de base, puis, en descendant, par une masse gypseuse avec argiles pouvant atteindre 30 à 50 m. d'épaisseur, mais coincée vers l'Ouest. La pandermite forme des rognons allant de 1 gr. à 300 kg., soit dans une boue argileuse, soit dans le gypse saccharoïde¹. On trouve, en même temps, des anhydrites compactes ayant l'aspect extérieur du marbre et un silicate blanc de calcium et de magnésium. Le borate exploité ainsi n'est pas un borate de sodium comme dans la plupart des autres gisements boratés, mais un borate de calcium hydraté, auquel on a donné son nom de pandermite, d'après le port de Pañderma

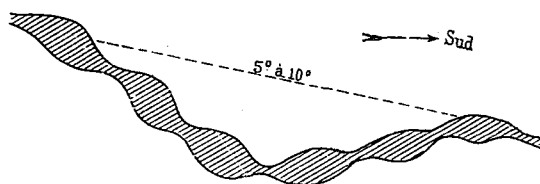


Fig. 93. — Coupe schématique des gisements de pandermite de Sultan Tchhair, d'après Weiss.

sur la mer de Marmara, où se fait son exportation. Sa densité atteint 2,5, et il se distingue par là, comme par sa capacité et par sa composition chimique, des borates légers du Chili.

La couche renfermant la pandermite a, dans l'ensemble, une pente de 5° à 15° vers le Sud, mais avec des ondulations et une allure lenticulaire, dont la figure 93 donne une idée. La puissance, qui atteint parfois 5 m. d'épaisseur, peut tomber rapidement presque à zéro. D'après les exploitants, les parties les plus épaisses seraient, en même temps, celles dont la teneur en pandermite est la plus forte.

Ces gisements ont été exploités, depuis un temps immémorial, par les potiers des Dardanelles. Organisés rationnellement vers 1865, ils produisaient 1 500 t. vers 1885. Ils sont montés à 15 000 t. en 1896, descendus à

¹ D'après P. Coulbeaux, il n'y aurait pas corrélation, mais seulement coïncidence entre les deux formations du gypse et du borate. Cette théorie nous semble contestable.

8 000 t. en 1902 et 1903 et remontés aujourd'hui à 12 000 ou 13 000 t. de pandermite, correspondant à 14 400 ou 15 600 t. de borax et acide borique. L'exploitation est entièrement souterraine. Le minerai tient, à l'état pur, 50 p. 100 d'acide borique et 55,85 après calcination. Commercialement, il est vendu sur la base de 44 p. 100.

Lac d'Ourmiah. — Une autre région asiatique riche en borates, où l'on peut prendre sur le vif le processus actuel de l'évaporation, est celle du *lac d'Oumiah*, en Perse : région où il existe, d'après Abich, une eau minérale contenant 1/2 p. 100 de borate de sodium au contact d'un pointement d'euphotide, c'est-à-dire dans des conditions qui rappellent les gisements salins associés aux ophites des Pyrénées par un phénomène d'ailleurs probablement tout à fait adventif.

Tibet. — Diverses régions désertiques du globe, également caractérisées par l'abondance des sources chaudes et la proximité des phénomènes volcaniques, présentent de même des gisements boratés beaucoup plus mal connus. Il suffit de citer le Tibet et l'Arménie.

3° c) BORATES DES ÉTATS-UNIS (CALIFORNIE, NEVADA) ¹

Les gisements de sels boratés existent dans l'Ouest des États-Unis, dans toute une vaste zone qui comprend la Californie du 39° au 33°, sur les deux versants de la Sierra-Nevada, avec la partie contiguë du Nevada. Ces gites étant tous d'extension limitée, les exploitations se sont déplacées successivement. D'abord situées de 1864 à 1872, au lac Clear au Nord de San Francisco, à Colombus dans le Nevada sur le parallèle de San Francisco, ou, au contraire, tout à fait au Sud, dans le comté de San Bernardino à l'Est de Los Angeles, plus tard elles ont été longtemps concentrées à Calico (117°, 35°) ; aujourd'hui, elles tendent à se reporter assez loin dans l'intérieur sur le 37°, dans la vallée de la Mort, les monts Funèbres et le désert d'Amargosa.

Dans tous les cas, il s'agit de régions désertiques, parfois caractérisées par l'abondance des sources chaudes (geysers du lac Clear, Soda springs au Nord de Colombus, etc.). quelquefois aussi par la proximité de gites mercuriels et de sulfatates comme au lac Clear : relation de voisinage analogue à celle constatée plus haut, en Toscane entre le mercure du mont Amiata et les soffioni, mais sans qu'il soit permis d'en conclure un rapport de cause à effet.

Les eaux superficielles, chargées de sels divers, les concentrent dans toute une série de bassins fermés, où cristallisent des boues alcalines avec borates, chlorures, carbonates et sulfates de sodium, et long-

¹ Coll. Ec. d. M., 1037, 1818. — 1877. EM. DURAND (Soc. d'Enc. p. l'Ind. Nat., 25 mai). — 1885. FUCHS (Ann. d. M. Bull., p. 645). — 1890. CH. YARLE. *Mineral resources* (description et historique). — 1893 (Z. f. pr. G., p. 82). — 1894. MARSILLON. *Mine de borate de chaux dans la vallée de la Mort en Californie* (La Nature, 5 mai). — 1902. CAMPBELL (Bull. U. S. G. S., n° 200). — 1902. GILBERT E. BAILEY (Bull. du California State Mining Bureau, n° 24). — *Mineral Industry* (statistiques annuelles).

temps on n'a pas connu d'autres gisements boratés, que ces boues (muds). Depuis, on est remonté à des gîtes plus anciens, dont les premiers dérivent par remise en mouvement et qui rappellent beaucoup ce que nous avons observé plus haut à Sultan Tchair. Enfin on a trouvé quelquefois, comme à Lang (los Angeles) en 1908, des veines lenticulaires de borate de calcium (colemanite), pouvant faire penser à l'incrustation de fractures analogues à celles des soffioni. Nous allons décrire rapidement les principaux de ces gisements.

Borax-Lake. — Si nous parcourons le pays du Nord au Sud, nous trouvons d'abord le *Lac de Borax*, Borax-Lake, situé au Sud-Ouest du lac Clear, à peu de distance des geysers californiens, et dominé par les collines du Sulfurbank, où nous aurons à signaler des gîtes de mercure.

Les eaux de ce lac contiennent environ 7 gr. de borate de sodium par litre d'eau, avec des chlorures et carbonates de sodium.

Après avoir essayé d'exploiter par évaporation, on s'est aperçu que les boues du fond du lac renfermaient, sur une épaisseur de 1, 50 m. à 1, 60 m. environ, des cristaux de borax parfois très beaux, en petites nappes interstratifiées superposées elles-mêmes à une masse salifère et on les a extraits quelque temps par dragages ou tranchées.

On a exploité de même le *lac Hachinhaua*, situé à 6 kil.W du lac de Borax : lac à sec pendant l'été, dont les efflorescences salines produisaient, en 1872, 250 t. de borax par an.

Groupe de Colombus. — Plus au Sud, et sur le versant Est de la Sierra Nevada se trouvent les gîtes de la région de *Carson Lake* et *Colombus*, qui étaient, vers 1880, les principaux producteurs.

Les principaux sont : *a*). Columbus-Marsh ; *b*). Rhodes-Marsh ; *c*). Tel's-Marsh ; *d*). Fish-Lake.

a) A Columbus-Marsh existait un dépôt de 15 km. de long sur 11 km. de large, présentant : au centre, une croûte de sel et, aux extrémités, de l'ulexite, sous forme d'efflorescences ou de boules formées de filaments soyeux caractéristiques.

b). A Rhodes-Marsh (18 km. N.-W de Colombus), on avait un gîte circulaire de 5 km. environ de diamètre. Au centre, sur près de 2 km², on trouvait le borax pur ; tout autour, il était mélangé : tantôt au sable, tantôt à l'ulexite, tantôt au sulfate de sodium, qui se trouve également au-dessous de la partie centrale.

c). A Tel's-Marsh (24 km. Sud de Colombus), on avait un dépôt superficiel de borax brut, d'une longueur de 9 à 10 km., d'une largeur de 4 km., d'une épaisseur de 0 12 m. à 0 45 m.

d). A Fish-Lake (16 km. Sud de Colombus Marsh), la surface était de 4 000 hectares et l'épaisseur moyenne de 0,20 m. avec une teneur en acide borique de 20 p. 100. Au centre, les efflorescences étaient formées d'un mélange intime de borates divers et de sels alcalins. Au Sud, une croûte mince de borax recouvrait du sable imprégné de borates divers.

Monts Funèbres (comté d'Inyo). — Cette région désertique et très déprimée a été activement exploitée dans ces dernières années. On y

trouve des types de gisements différents des précédents et un peu plus continus : gisements, dont les boues boratées semblent le remaniement secondaire et qui présentent la colemanite en amas associés au gypse comme en Asie Mineure, ou même en veines lenticulaires verticales. Dans le comté d'Inyo, au Sud du *Mont Funèbre*, vers l'Amargosa, il existe de grands dépôts de borate de calcium intercalés au milieu des schistes, argiles et grès à minces couches de gypse qui forment le terrain de la région. L'Amargosa a produit, à leurs dépens, des marais salants à sels boratés. Les sources chaudes et les volcans de boue sont abondants.

Cette région du Mont Funèbre, près de la Vallée de la Mort, à 120 m. au-dessus de la mer, est, comme son nom l'indique, absolument désolée. Les exploitations qui s'y sont créées ont été amenées à construire des voies ferrées, créer des oasis, etc.

Calico et San Bernadino. — Enfin, du 35° au 36° degré, les gites de la région de *Calico* (désert Mohave) et du comté de *San Bernadino*, situés eux aussi dans un désert à sources thermales sulfureuses, ont donné lieu à une exploitation active.

Les premiers découverts de ces gites occupaient un fond de lac desséché de 18 km. de long sur 12 km. de large. On y trouvait : à la surface, un mélange de sable et de borax formant un treizième de la masse ; au-dessous, le borax en masse cristallisée avec du sel et de la thénardite.

Tous ces dépôts qualifiés de boues (muds) ont été complètement abandonnés en 1908.

Industrie. — L'industrie des borates en Californie subit, comme beaucoup d'industries américaines, suivant l'état du marché, de très vives fluctuations. C'est ainsi qu'après être monté à 54 000 t. en 1907, on est retombé à 22 600 t. en 1908, les prix du borax ayant baissé notablement, pour revenir à 37 000 t. en 1910. En 1908, les exploitations en activité ont été réduites à celle de la Pacific Coast Borax C^r et de la Sterling Borax C^r. On a abandonné la mine de colemanite de Calico, autrefois la plus productive, et les dépôts superficiels à basse teneur du comté de San Bernadino, ainsi que les exploitations du comté de Ventura.

3° d) BORATES DU PÉROU ET DU CHILI¹

Pérou. — Des exploitations importantes de borate ont été organisées, depuis 1899, par la Compagnie boratière d'Arequipa à la grande lagune de Salinas située par 16°22 et 71°7 entre Arequipa et le lac Titicaca, à 4 250 m. Les montagnes avoisinantes sont formées de roches volcaniques, surtout de coulées d'andésites amphiboliques. On est au milieu d'une série de volcans éteints, dont quelques-uns, comme le Misti, conservent leur appareil extérieur, tandis que d'autres ont été fortement érodés. Le Pichu-Pichu a encore des solfatares en activité. Le borate se présente au fond d'une conque, en une couche de 0,40 à 1 m, que recouvrent des sables fins avec borates et une croûte superficielle de chlorure

¹ Coll. Ec. d. M., 2042.

et sulfate de sodium. Le borate est de l'ulexite (sodo-calcique) tenant 30 p. 100 d'acide borique, ou 50 p. 100 après dessiccation.

Le borate, d'origine première en relation avec les roches volcaniques, s'est concentré surtout dans la partie centrale de la lagune. L'extraction annuelle est évaluée à 1 500 t.

Chili. — Au Chili, on exploite l'ulexite à Maricunga (Nord de Copiapo) et Ascutan près de la frontière brésilienne, dans des conditions qui rappellent la Californie ¹.

¹ 1885-87. DARAPSKY (Chem. Z., 1885, p. 1305; 1886, n° 10; 1887, n° 40, p. 605).

CHAPITRE XIX

PHOSPHORE

P = 31,04

I. — USAGES, STATISTIQUE ET COMMERCE

Usages du phosphore. — La grande application des composés du phosphore est l'industrie des engrais minéraux, sur laquelle nous allons longuement insister. Mais il faut auparavant signaler quelques autres emplois secondaires, dont le principal est la fabrication des allumettes ¹.

Le *phosphore* proprement dit constitue, comme on le sait, deux variétés allotropiques utilisables : le *phosphore ordinaire* et le *phosphore rouge*, ce dernier obtenu en chauffant à 250° à l'abri de l'air. Depuis 1896, le phosphore blanc, qui a servi longtemps à la fabrication des allumettes, est remplacé en France, pour cette application, par le sesquisulfure de phosphore, qui est lui-même obtenu par le mélange du soufre pulvérisé avec le phosphore rouge.

La consommation de la France est d'environ 40 t. de phosphore pour 40 milliards d'allumettes. Notre pays exporte, en outre, 150 à 200 t. Pour le monde entier, la consommation de phosphore peut être évaluée à 1 000 t.

L'industrie du phosphore pour allumettes a été créée, en 1837, en Autriche, puis importée à Lyon, en 1838, par la maison Coignet, développée ensuite à Birmingham, enfin créée en Suède, aux Etats-Unis et en Allemagne.

Le prix du phosphore était de 24 fr. le kilogramme en 1838. Il tomba à 8,50 fr. en 1840. Il est aujourd'hui de 12 fr. pour le phosphore blanc et 16 fr. pour le phosphore rouge.

Une petite quantité de phosphore est, en outre, consommée par la pharmacie, par la fabrication des pâtes vénéneuses, enfin par la métallurgie

¹ La France, indépendamment de sa consommation, exporte environ un million de kilogrammes d'allumettes. En 1894, la production des manufactures de l'Etat était exactement de 27.440.703.600 allumettes, dont 23.471.447.400 en bois au phosphore ordinaire ; 1.523.448.000 en bois au phosphore amorphe soufrées ; 1.845.483.700 en bois au phosphore amorphe paraffinées (suédoises) et le reste, soit 900.324.500, en cire. En 1910, la régie a vendu 44 milliards d'allumettes, soit 1 136 allumettes par habitant, représentant un débours de 1 fr. 20, dont 1 fr. 01 sont revenus au Trésor. La fabrication des allumettes a lieu dans les six fabriques de Pantin, Aubervilliers, Saintines, Trélazé, Bègles et Marseille.

pour la production des bronzes phosphoreux. On fabrique encore, avec le phosphore, le chlorure de phosphore, l'anhydride et l'acide phosphorique. Tout ce phosphore était autrefois extrait des os par une opération qui fournissait, en même temps, la gélatine. On l'extrait maintenant de plus en plus des phosphates minéraux, qui coûtent beaucoup moins cher, mais sont plus difficiles à traiter.

Le phosphate de chaux¹ est donc le minerai général du phosphore. En dehors de son application agricole, le phosphate de chaux non siliceux est utilisé (notamment en France et en Belgique), sous forme d'additions, pour faciliter la déphosphoration complète des fontes de fer peu phosphoreuses. On l'emploie également en grand dans la métallurgie du cuivre suivant le procédé Manhès et dans celle du nickel, auquel il n'est possible de donner une malléabilité parfaite qu'au moyen du phosphore. Le phosphate mono-calcique donne, par fusion, un verre transparent et limpide que l'on peut travailler comme le verre ordinaire.

Enfin, dans le groupe des phosphates minéraux, nous devons encore mentionner, pour une application toute différente, le phosphate d'aluminium qui constitue la pierre précieuse, appelée *turquoise*.

Besoins de l'agriculture en phosphates et consommation mondiale. —

Comme nourriture des plantes, le phosphore et l'azote, dont les analogies chimiques sont connues, se trouvent de même rapprochés par le rôle qu'ils jouent en agriculture. C'est, en effet, de ces deux corps principalement (et de la potasse) que vivent les végétaux ; et, pour une raison analogue, éliminés tous deux peu à peu des couches superficielles de terre végétale par l'influence de la végétation, ils doivent lui être restitués à l'état d'engrais artificiels : phosphate de chaux et nitrate de soude.

La présence de l'acide phosphorique dans certaines parties des plantes, et principalement dans leurs graines, est connue depuis bien longtemps. Les cendres en renferment, de 5 p. 100 dans les herbages à 25 ou 30 dans les céréales,

Chaque récolte enlève donc au sol une certaine quantité de phosphate, dont moitié à peine lui est restituée à l'état de fumier. Le reste passe dans les animaux et de là, pour la plus grande part, dans l'homme, où on le retrouve dans la charpente osseuse dans le cerveau, etc. Cet acide phosphorique, introduit dans le corps humain, est ensuite perdu et immobilisé pour la plus grande partie par suite du respect porté aux sépultures.

Dès 1856, Elie de Beaumont, dans un travail célèbre, essayant de se rendre compte de ce qu'il avait pu être enlevé de phosphate au sol européen depuis que le christianisme a supprimé la crémation, arrivait aux chiffres suivants.

Les os de l'homme, remarquait-il, ne renferment pas moins de 53 p. 100 de phosphate de chaux tribasique, ce qui fait environ 2,44 kg. de cette substance dans le squelette d'un adulte, auxquels viennent s'ajouter encore 0,86 kg. contenus dans les chairs, soit un poids total de 3,30

¹ Nous conserverons généralement, dans ce chapitre, l'expression phosphate de chaux (au lieu de phosphate de calcium), qui, surtout lorsqu'il s'agit de la richesse minérale, est restée dans la pratique courante.

kg. de phosphate tribasique contenu, en moyenne, dans un corps humain. En admettant pour tenir compte des enfants, un poids total de 2 kg. seulement de phosphate de chaux disparu avec chaque habitant de notre pays, et en estimant à un milliard le nombre total de ceux qui ont vécu pendant dix-neuf siècles, il en résulterait, si ce phosphate n'avait pas été en partie redissous, que la quantité totale de phosphate de chaux isolée dans les sépultures pourrait être représentée par une couche de 2 m. de puissance, étalée sur un kilomètre carré, ou par une mince pellicule continue de 4 millièmes de millimètre d'épaisseur, répandue sur la surface de la France entière. On peut également remarquer que les 1 600 millions d'habitants actuellement vivants contiennent plus de 600 000 t. de phosphore.

Si l'on ajoute à ce chiffre la quantité de phosphate emportée journellement par les fleuves à la mer, on se rend compte aussitôt de la nécessité de restituer au sol, sous peine d'appauvrissement, ce qui lui a été pris ainsi.

Cette restitution, il est vrai, peut s'opérer, pendant quelque temps et pour certains sols, par l'action du sous-sol. On a remarqué, en effet, que presque tous les terrains contiennent une certaine quantité de phosphore, atteignant parfois, dans les calcaires des formations secondaires, 1 et même 2 p. 100 de phosphate de chaux¹. E. Nivoit, étudiant à ce propos les terrains des Ardennes, a montré que la proportion d'acide phosphorique disséminée dans les roches de cette région allait de simples traces à 0,2 ou 0,3 p. 100 dans quelques roches cristallines comme les eurites de Laifour et de Revin et les diorites de Mayrapt.

Clarke, en combinant de nombreuses analyses, est arrivé à une teneur moyenne de 0,09 p. 100 ou 900 gr. à la tonne. Un mètre cube de terrain quelconque renferme donc près de 3 kg. de phosphore.

Ce sont là des proportions sensibles; mais il faut remarquer qu'en général le phosphate ainsi disséminé n'est pas assimilable par les végétaux et que, par suite, la nécessité de l'addition de phosphate venant du dehors s'impose comme une nécessité de la culture.

Cette nécessité a commencé à être comprise, vers 1822, en Angleterre, où fut créée plus tard, en 1852, par Sir J. Lawes, l'industrie des superphosphates. En France, un travail d'Elie de Beaumont, en 1856, a beaucoup contribué à développer cette industrie. Depuis lors, ses progrès ont été considérables, comme le montre le tableau suivant qui résume, à vingt-cinq ans de distance, la consommation d'engrais phosphatés dans le monde².

¹ Cette proportion, relativement élevée, de phosphate de chaux disséminé dans les calcaires jurassiques et crétacés explique les bons effets produits par le chaulage des terres limoneuses à l'aide de ces calcaires employés comme amendements.

² Les éléments de ce tableau sont empruntés à une note de L. Aguilon sur l'industrie des phosphates minéraux (*Annales des Mines*, mai 1909), dans laquelle nous puiserons largement pour tout ce qui concerne le commerce des phosphates.

TABLEAU 29. — CONSOMMATION MONDIALE APPROXIMATIVE DES PHOSPHATES NATURELS
EN MILLIERS DE TONNES (mt)

PAYS CONSOMMATEURS	1885	1900	1905	1906	1907	1908
États-Unis	500	882	950	1 148	1 211	1 365
France	250	746	847	877	977	1 106
Allemagne	150	358	485	465	614	770
Italie	30	140	253	331	443	590
Angleterre	300	355	429	437	505	529
Belgique	150	177	252	227	266	»
TOTAL avec divers .	1 600	2 845	3 728	4 077	4 728	5 218

A ces chiffres, il faut ajouter, pour 1907, 2 600 000 t. de scories phosphatées, équivalant à autant de superphosphates et produites : pour 1 800 000 t. par l'Allemagne, 405 000 t. par la France, 325 000 t. par la Belgique, 96 000 t. par l'Angleterre.

Ce tableau met en évidence des conditions de développement qui varient suivant la forme de l'agriculture adoptée dans chaque pays et suivant les progrès qui y restent à réaliser. On peut remarquer le faible développement actuel de la consommation en Angleterre et en Belgique, où l'emploi des phosphates est relativement ancien. Il en est de même, à un degré moindre en France. Au contraire, l'accroissement est très rapide en Allemagne (2,7 fois plus en 1908 qu'en 1898), en Hollande (2,2) et proportionnellement beaucoup plus en Italie où, de 1898 à 1908, le multiple de l'accroissement est de 7,4; en Autriche-Hongrie, de 7; en Espagne, où il est de 15. En ce qui concerne le débouché offert aux phosphates, ce débouché reste énorme, par suite de l'entrée en jeu progressive de tous les pays neufs : le phosphate étant une substance de commerce mondial qui, par mer, va aisément du Pacifique en Allemagne ou de Tunisie au Japon. Mais, en ce qui concerne les besoins des vieux pays, il semble que l'on se rapproche du moment où, la restitution étant équivalente à la dépense, la consommation n'a plus de raison de s'accroître, surtout si l'on voit s'accroître la tendance actuelle à transformer les cultures de blés en herbages pour profiter des hauts prix du bétail.

Mode d'emploi des phosphates. Assimilabilité. — Les phosphates minéraux, dont nous étudierons ultérieurement les gisements, sont employés en agriculture sous trois formes principales : superphosphates¹ (qui sont, en réalité, un mélange de phosphate mono-calcique avec du sulfate de

¹ Nous ne pouvons donner ici une étude sur la très importante question des superphosphates. On consultera avec fruit, sur ce sujet, un mémoire de D. LEVAT dans les Ann. des Mines de 1895. — Voir 1910. CAMBON. *Les procédés nouveaux de fabrication des superphosphates* (La Nature, 19 fév.). — Discussion à la Chambre en 1909.

calcium, obtenu par le traitement à l'acide sulfurique), scories phosphatées et phosphates naturels moulus. Les deux premiers modes sont de beaucoup prépondérants et s'équivalent à peu près, comme quantité, en France. Le troisième est insignifiant. Cela tient à la nécessité de fournir aux plantes du *phosphate assimilable*. Suivant les pays et suivant les moments, le consommateur demande, en outre, les superphosphates sous des formes très variées.

Dans l'assimilabilité des phosphates, leur état chimique et leur cohésion interviennent. Ce dernier point est évident, et il va sans dire que le phosphate doit être réduit en poussière pour être utilisé. La question d'état chimique a été beaucoup plus discutée. L'idée générale est que les plantes, pour assimiler le phosphate, doivent le recevoir sous une forme soluble : ce qui exclut la possibilité d'employer directement des phosphates cristallisés ou cristallins, comme les apatites ou les phosphorites. D'où la nécessité de transformer même les phosphates sédimentaires qui renferment à peine un tiers de phosphate soluble. Pour apprécier cette solubilité, les uns, et c'est le cas général dans le Nord de la France, demandent que le phosphate soit rendu soluble dans l'eau. Le Midi apprécie plutôt la solubilité dans le citrate. Les phosphates de fer et d'aluminium n'étant pas solubles dans le citrate et produisant de plus ce qu'on appelle la *retrogradation*, c'est-à-dire le retour du superphosphate à l'état de phosphate bicalcique, il en résulte une proscription contre les phosphates tenant plus de 5 à 6 p. 100 d'oxydes de fer et d'aluminium. Divers chimistes ont soutenu qu'il y avait, dans l'habitude de transformer le phosphate en superphosphate, un préjugé et que la pulvérisation suffisait : la différence n'étant nullement comparable à l'inégalité de prix des deux substances.

A cet égard, l'introduction sur le marché des scories de déphosphoration à partir de 1886, a montré qu'il n'était pas nécessaire de rendre l'acide phosphorique soluble dans l'eau par un traitement chimique. Néanmoins l'industrie des superphosphates en a peu souffert. Les superphosphates ont, en effet, une avantage incontestable, celui de leur rapidité d'action, qui rend l'effet immédiatement palpable et qui, dans le cas ordinaire où la terre est travaillée par un fermier, permet à celui-ci de profiter aussitôt des engrais chimiques apportés par lui à la terre. On peut ajouter la sécurité commerciale que donne aux consommateurs une marchandise fournie par de grosses sociétés industrielles. Enfin, en Angleterre, la question ne se pose pas : l'Angleterre, qui importe tous ses phosphates, n'importe que des phosphates riches, pour lesquels la transformation est tout indiquée et, d'autre part, ayant, par son industrie métallurgique, de l'acide sulfurique à un prix particulièrement bas.

Cependant l'emploi des scories phosphatées, fournies en quantités toujours croissantes par les procédés de déphosphoration du fer, a conquis un marché déjà comparable à celui des superphosphates¹ et nécessaire-

¹ 1887. PERCY et GILCHRIST. *Emploi des scories basiques en agriculture* (Com. au Iron and Steel Institute : cf. Génie civil du 6 août 1887). — 1887. P. WAGNER. *Die Thomas-schlacke, ihre Bedeutung und Anwendung als Düngemittel* (Winter, Darmstadt). — 1887. ALBERT (H. et E.). *Berichte über die Wirkungen des Thomas Phosphat Mehls* (Biebrich). — 1887. P. SÉJOURNET. *Phosphates métallurgiques des aciéries du Creusot* (Nancy).

ment destiné à grandir, puisque les métallurgistes cherchent, avant tout, à se débarrasser de ce sous-produit encombrant. Ces scories sont considérées comme comparables, poids pour poids, à un superphosphate et leur consommation mondiale atteint actuellement déjà 2 600 000 t., dont 1 800 000 fournies par l'Allemagne (1907) et 405 000 t. par la France : soit, pour l'Europe occidentale, environ les trois quarts de la consommation en phosphates naturels.

Prix des phosphates et superphosphates. — Le commerce des phosphates obéit à certaines règles qu'il est nécessaire d'expliquer tout d'abord. Quand il s'agit de phosphates naturels, la teneur est évaluée en phosphate tricalcique à 20 p. 100 de phosphore ; quand il s'agit de superphosphates, on compte en acide phosphorique à 43,66 p. 100 de phosphore¹.

Par définition, un phosphate à 70 p. 100 (700 kg de phosphate pur à la tonne) renferme 70 unités et vaut 70 fois le prix de l'unité. C'est-à-dire que ce prix de l'unité est celui de 700/70, ou 10 kilogr. de phosphate².

Dans les superphosphates, on compte par unité d'acide phosphorique aux 100 kg. : autrement dit, par kilogramme d'acide phosphorique soluble dans le citrate. Une tonne de superphosphate, titrant 18 p. 100, contient 180 kg. d'acide phosphorique. Si celui-ci vaut 0,45 le kg., le superphosphate vaudra $180 \times 0,45 = 81$ fr. la tonne.

D'autre part, 100 kg. de phosphate donnent environ (avec 90 kg. d'acide sulfurique), 175 kg. de superphosphate. Si le phosphate était à 70 p. 100 (32 p. 100 d'acide phosphorique), le superphosphate titrera 18 p. 100 d'acide phosphorique comme dans l'hypothèse précédente.

Les cours, quand il s'agit des phosphates naturels, sont réglés par un marché mondial, où la concurrence est très vive. Le prix de la tonne varie avec la teneur et avec le prix de l'unité, qui lui-même dépend, tant d'une cote variable que de la provenance.

Ainsi, pour les phosphates africains à 58/63 rendus dans un port d'Europe, le prix sera environ de 0,60 fr. l'unité : soit 36 francs par tonne à 60 p. 100. L'unité tombera à 0,35 fr. pour le 40/45 des craies lavées françaises et montera jusqu'à 0,92 fr. pour le 80/85 p. 100 du Pacifique. Si l'on envisage la même qualité de phosphate à 50 p. 100, on voit que l'unité valait 1 fr. à 1,25 fr. en 1856 et autant en 1880. En représentant ce cours par 100, on constate que le cours, depuis lors, a baissé d'abord jusqu'à 37, s'est relevé à 54 en 1907, est retombé à 43 en 1908.

Dans les superphosphates, le prix du kilogramme d'acide phosphorique a été de 2 fr. vers 1880, de 0,50 fr. en 1890. Il est, en 1911, de 0,40 fr.

¹ On passe de la teneur en phosphore à la teneur en acide phosphorique en multipliant par 2,29 ; de l'acide phosphorique au phosphate tricalcique en multipliant par 2,18 ; du phosphore au phosphate par 5 ; ou inversement, du phosphate à l'acide phosphorique en multipliant par 0,458, de l'acide phosphorique au phosphore par 0,436, du phosphate au phosphore par 0,20. Un phosphate à 30 p. 100 d'acide phosphorique contient $30 \times 2,18 = 65,40$ p. 100 de phosphate.

² Dans le commerce de détail, on compte de préférence un prix fixe par 100 kilogrammes ou par tonne, pour des richesses comprises entre telle ou telle limite. On exige, en outre, une ténuité telle que tout passe au tamis n° 60 ou 70.

II. — HISTOIRE DE L'INDUSTRIE PHOSPHATÈRE ET STATISTIQUE ACTUELLE

L'industrie des phosphates a commencé par compter sur des ressources assez limitées. Successivement ont été faites une série de découvertes, qui ont transformé le commerce de cette substance et alimenté une consommation croissante. Actuellement il existe, notamment en Algérie et en Tunisie, des ressources en phosphates qu'on peut considérer comme pratiquement illimitées, et cela même en tenant compte uniquement des phosphates à teneur relativement haute, 55/60, qui sont aujourd'hui les phosphates marchands. Si l'on faisait entrer en ligne de compte les phosphates plus pauvres, pour lesquels on trouvera peut-être un jour un moyen d'enrichissement économique, ces réserves s'augmenteraient dans des proportions énormes. Etant donnée la difficulté de reconnaître le phosphate dans une région nouvelle, où il ne prend pas les formes auxquelles on est accoutumé, on peut croire que les continents, dans lesquels nous commençons à peine à pénétrer, contribueront également un jour à fournir une industrie, qui est donc très loin de son épuisement.

Le tableau ci-joint résume quelques dates principales de cette industrie, surtout en ce qui concerne la France qui y tient une très grande place.

TABLEAU 30. — DÉCOUVERTE DES PRINCIPAUX GISEMENTS PHOSPHATÉS

1810. Découverte par Berthier du phosphate dans le gault du Pas-de-Calais.
 1822. Phosphates anglais du bonebed infraliasique et du crag tertiaire.
 1852. Invention des superphosphates.
 1855. Ardennes, Meuse. — Albien. — Nodules à 35 ou 40 p. 100 de phosphate.
 1867. Caroline. — Phosphates à 58/63 p. 100.
 1868. Drôme. Saint-Paul Trois-Châteaux. — Albien. — Sable à gros grains, 35/40 p. 100; nodules 50/60 p. 100.
 1868. Ain : Bellegarde. — Albien. — Petits nodules à 40 p. 100.
 1869. Lot : Tarn-et-Garonne. — Phosphorites du Quercy. — Roche à 70/75 et 40/45 p. 100.
 1873. Boulonnais. — Albien. — Nodules à 35/40 p. 100.
 1876. Côte-d'Or (Auxois). — Lias inférieur. — Nodules à 60 p. 100.
 1877. Pas-de-Calais : Pernes. — Albien. — Nodules à 40/45 p. 100.
 1877. Mons (Belgique). — Danien. — Craie phosphatée à 20/25 p. 100.
 1880. Haute-Saône (Jussey, Vitrey). — Lias inférieur. — Nodules à 60 p. 100.
 1880. Gard (Tavel). — Néocomien. — Roche à 70 p. 100.
 1883. Mons (Belgique). — Danien. — Sables phosphatés en poches à 60/65 p. 100.
 1883. Nord (Cambrais, Quiévrly). — Sénonien. — Phosphate sableux à 20/25 p. 100.
 1883. Scories de déphosphoration en Meurthe-et-Moselle.
 1886. Somme et Pas-de-Calais (Beauval, Orville). — Sénonien. — Sables phosphatés à 70/75 p. 100.
 1886. Oise (Hardivillers). — Sénonien. — Craie phosphatée à 25/30 p. 100.
 1889. Floride. — Hard rock à 77/78 et land pebbles à 68/72 p. 100.
 1893. Algérie (Tébessa). — Eocène. 55/60 p. 100.
 1894. Tennessee. — Carbonifère. 78/80 p. 100.
 1899. Tunisie (Gafsa). — Eocène. 58/63 p. 100.
 1900. Pacifique. — Quaternaire à 75/85 p. 100.

Si nous remontons un peu en arrière, en 1886, une statistique française très complète arrivait, pour tous les gisements de phosphates alors exploités en France — gisements répartis sur 30 000 hectares de superficie — à un cubage approximatif de 32 MT de minerai (6 400 000 t. d'acide phosphorique).

Dans ce calcul, les départements de la Meuse, du Pas-de-Calais, de la Côte-d'Or et du Lot entraient seuls pour les chiffres suivants :

Meuse	24 196 000 tonnes.	16 à 22 p. 100	d'acide phosphorique.
Pas-de-Calais.	1 638 000	— 20 à 30	—
Côte-d'Or.	1 500 000	— 29	—
Lot.	1 240 000	— 20	—

Il n'est pas sans intérêt économique de remarquer que, sur les 24 millions de tonnes des phosphates verts de la Meuse, on en a extrait au total moins de 2 et qu'actuellement ce gîte, dominé par de plus riches, est à peu près abandonné.

A cette époque, il y avait, en outre, un autre grand producteur américain, la Caroline, qui, trente ans plus tard, continue toujours à alimenter le marché et des gisements, au contraire abandonnés aujourd'hui, en Angleterre, dans le Nassau, etc.

Actuellement, la production mondiale peut, d'après une enquête de L. Aguillon, s'évaluer de la manière suivante, en ce qui concerne seulement les phosphates naturels, et non compris les 2 600 000 t. de scories de déphosphoration précédemment signalées (1908).

TABLEAU 31. — PRODUCTION MONDIALE DES PHOSPHATES NATURELS
EN MILLIERS DE TONNES

	FRANCE, ALGÉRIE, TUNISIE			ÉTATS-UNIS	PACIFIQUE	BELGIQUE	DIVERS ¹	TOTAUX
1900	588	276	171	1 500	34	236	40	2 845
1908	400	360	1 258	2 500	300	300	100	5 218
1910	400	350	1 280	2 700	456	200	100	5 430

¹ Podolie, Espagne, Norvège, Antilles, Canada.

Les phosphates mentionnés ici sont de qualités et, par suite, de valeurs très différentes. On peut compter, comme teneurs moyennes en phosphate : 50 p. 100 en France et en Belgique, 60 p. 100 en Algérie et Tunisie, 74 aux États-Unis, 82 pour le Pacifique.

Nous allons résumer rapidement ce qui concerne ces centres principaux de production industrielle. Les détails relatifs à leur industrie, comme les indications sur les gisements moins importants, trouveront leur place à l'occasion des diverses monographies.

Tunisie. — La production tunisienne, actuellement en voie d'accroissement rapide, comprenait, en 1908 : 900 000 t pour Gafsa, 195 000 t. pour le Kalaat-Djerda, 115 000 t. pour le Kalaat-es-Senam (Compagnie du Dyr) : au total 1 267 000 t. En 1910, la Tunisie a exporté 1 282 000 t., dont 950 000 pour Gafsa. Si l'on se reporte à 1899, première année de l'exploitation de Gafsa, la production de la Tunisie était alors de 70 000 t.

Algérie. — Bien que les richesses de l'Algérie soient peut-être comparables à celles de la Tunisie, les différences du régime administratif et

l'intervention trop fréquente de la politique dans le régime minier font que, de 268 000 t. en 1898, l'Algérie s'est seulement élevée à 300 000 en 1908 et 345 000 t. en 1909, après avoir passé par un maximum de 359 000 t. en 1903. Géologiquement signalés dès 1873 et surtout depuis 1883, les gisements algériens n'ont pris leur essor qu'en 1892 dans la région de Tébessa. Là, les gites du Kouif et d'Ain-Kissa ont passé de 160 000 t. en 1902 à 296 000 t. en 1908. Un troisième gisement, celui du Dyr, un moment prospère, a été arrêté en 1909. En 1910, on a annoncé la présence, à 100 km. Sud de Tébessa, au Djebel Onk, d'un gisement qui contiendrait, dit-on, près de 200 MT de phosphate à 60 p. 100.

France. — Les gisements en nodules de l'infra-crétacé, du lias, etc., que nous décrivons plus loin, étant abandonnés, la production française vient uniquement des craies phosphatées sénoniennes analogues aux craies belges et de ce qu'il peut encore rester à prendre dans les poches de sables riches, type de la Somme.

Belgique. — La Belgique vit, depuis 1877, sur les craies phosphatées du sénonien, exploitées dans deux districts principaux : celui de Mons, qui donne surtout des craies phosphatées à faible teneur (jusqu'à 40/45 après enrichissement) et celui de Liège ou de la Hesbaye, à phosphates plus riches, dont la superficie est évaluée à 12 000 hectares.

Etats-Unis. — Aux Etats-Unis, on a successivement découvert trois grands districts phosphatiers : la Caroline (1867), la Floride (1889), le Tennessee (1894), auxquels semble devoir s'ajouter un autre gisement récemment reconnu dans le carbonifère des « Public Lands » du Wyoming, de l'Utah et de l'Idaho. La Caroline produisait 450 000 t. en 1886, 550 000 t. en 1889 ; elle est descendue à environ 200 000 t. et semble, par conséquent, s'épuiser. La Floride, beaucoup plus jeune, est, au contraire, encore dans la période croissante et a fourni : en 1908, 1 550 000 t. ; en 1909, 1 900 000 t. ; en 1910, 2 000 000 t. Le Tennessee a produit 600 000 t. en 1907, 400 000 t. en 1908, 388 000 t. en 1909, 440 000 t. en 1910. Ses phosphates riches à 78/80 doivent supporter, pour arriver à la côte, 600 km. de chemin de fer.

Pacifique. — Cette industrie toute neuve a eu un accroissement rapide depuis 1907. En 1911, elle a atteint 456 000 t. (250 000 t. pour Ocean et Nauru, 153 000 t. pour Christmas, 41 000 t. pour Angaur, 12 000 t. pour Makatea) et l'on s'attend à la voir bientôt arriver à 600 000 t.

III. — MINÉRAIS ET RÔLE GÉOLOGIQUE DU PHOSPHORE

Nous avons déjà eu l'occasion de noter la présence constante du phosphore dans les terrains, roches et sédiments. Donnant un phosphate légèrement soluble, il est entraîné en partie par les eaux vers la mer, où on en retrouve des traces, qui seraient plus abondantes si ce phosphore n'y était pas sans cesse emprunté par la vie et reprécipité. Les organismes, pour lesquels le phosphore est indispensable, le puisent, soit dans les terrains par l'intermédiaire des plantes, soit dans l'eau de la mer. Ces organismes, en se décomposant, rendent peu à peu leur phosphate de chaux au monde minéral et aux eaux, pour resservir dans un cycle nouveau.

Si nous passons aux concentrations anormales qui peuvent former les

gisements utiles, le minerai de phosphore, de beaucoup le plus répandu, est le phosphate de chaux sous ses diverses formes, qui tient, à l'état d'apatite cristallisée, 91 p. 100 de phosphate tricalcique 3CaO , P^2O^5 , renfermant à son tour 20 p. 100 de phosphore. Mais il existe, en outre, quelques autres phosphates, intéressants à signaler comme indications métallogéniques. Tous ces phosphates peuvent se diviser en deux groupes principaux : les uns, qui ont cristallisé dans les roches ignées basiques ou acides et les autres, qui résultent d'une remise en mouvement manifestement superficielle et opérée sous l'action des eaux.

Au premier groupe, nous rattacherons l'apatite des roches basiques et les divers phosphates associés au groupe stannifère : les uns et les autres fréquemment caractérisés par l'intervention du fluor ou du chlore, qui paraissent avoir été indispensables à la cristallisation parfaite en phosphates. En dehors de l'apatite même, ce sont : la wavellite; l'amblygonite; la klaprothine, où le phosphore s'associe avec le calcium, l'aluminium, le fer et le magnésium; la monazite (cérium, lanthane et didyme); la xénotime, dans laquelle interviennent l'yttrium et le cérium, etc. Il est à remarquer que l'apatite contient parfois du plomb, du cérium, de l'yttrium, etc.

Dans le second groupe, nous faisons rentrer tous les phosphates associés avec des matières organiques, comme la stercorite, la struvite, la brushite des guanos (avec soude, magnésie ou chaux), les phosphates d'alumine des grottes de la Minerve et la turquoise (alumine), puis ces phosphates métalliques qui apparaissent seulement sur les affleurements : phosphates de fer (vivianite et dufrénite); chloro-phosphate de plomb (pyromorphite); phosphate de cuivre (lébéthénite, lunnite); phosphate de zinc (hopéite) et, probablement, phosphate d'uranium (uranite, chalcote).

Le phosphore est un élément relativement très répandu dans la nature. On peut, d'après les analyses de Clarke, évaluer à environ 1 p. 1 000 sa teneur moyenne dans l'écorce terrestre (0,09 ou 0,10). La couche superficielle de la Terre, envisagée sur 1 m. d'épaisseur et sur $145\,000\,000\text{ km}^3$, contient ainsi 435 milliards de tonnes de phosphore. Le phosphore tenait donc une place notable dans le magma igné profond, sans doute à l'état de phosphures. Si nous abordions ce magma lui-même assez profondément pour rencontrer du fer natif, nous y trouverions, sans doute, une fonte phosphoreuse, dont les météorites nous apportent un indice par leur phosphore de fer, de nickel et de magnésium. En présence de la chaux, qui est intervenue à peu près dans toutes les opérations de métallurgie interne, ne fut-ce que par endomorphose de calcaires, le phosphore a, comme il le fait dans nos usines, passé dans la scorie. C'est dans les roches jouant le rôle de scories basiques que l'on trouve la plus grande richesse en phosphore sous la forme d'apatite. Dans les écumes plus légères, plus acides et plus alcalines, le phosphore n'a été entraîné que grâce à l'intervention du chlore ou du fluor, dont la présence paraît ordinairement nécessaire pour permettre sa cristallisation : tous les phosphates de calcium d'origine quelconque tendant toujours à prendre la composition de l'apatite. Ce phosphore a pu contribuer à faciliter certaines cristallisations de silice et de silicates, prenant ainsi dans la nature

un rôle qu'on lui a attribué dans diverses synthèses. Il s'est alors plus localisé dans diverses roches, dont la teneur moyenne en phosphore est plus faible, mais au milieu desquelles on trouve des concentrations locales d'apatite, amblygonite, etc.

Ainsi le phosphore vient occuper, en métallogénie, une place très différente de celle que les chimistes lui attribuent d'ordinaire à côté de l'azote. Il se rapproche du groupe du fer, vers lequel bien des opérations ultérieures de métallurgie naturelle tendent à le ramener, constituant finalement cette grande classe des sesquioxydes de fer phosphoreux qui passe elle-même à l'alumine. Nous pouvons tracer une chaîne Al-Fe-Ph-Ca, dans laquelle des rapprochements tendent sans cesse à s'établir d'un corps au suivant. Pour que la séparation du fer et du phosphore primitivement associés se soit bien faite, il a fallu, comme nous le verrons mieux au chapitre du fer¹ : 1° que les minéralisateurs sulfurés soient intervenus : le fer allant se précipiter à l'état de sulfure sans entraîner de phosphore ; ou 2° qu'un excès de chaux ait facilité la formation ignée du phosphate de chaux éliminé dans les scories basiques ; ou enfin 3° qu'une réaction analogue, surtout en présence de calcaires, ait épuré ultérieurement, par dissolution, des minerais de fer, d'abord phosphoreux, et débarrassés de leur phosphore dans ce métamorphisme ou cette métasomatose. Sans quoi, si l'on remonte à l'origine, on trouve le phosphore associé au fer, comme il l'est avec le vanadium.

Je viens déjà de faire allusion aux altérations superficielles. Ces réactions de surface jouent, nous allons le voir, un très grand rôle pour le phosphore : le phosphate tricalcique étant légèrement soluble dans l'eau, surtout en présence de l'acide carbonique, du chlorure de sodium, et de ces acides faibles qui se trouvent à peu près dans toutes les eaux et pouvant par suite être éliminé, avec recristallisation à distance produisant un «*nourrissement*» de phosphates déjà formés. Avant de passer aux cas où cette action est incontestable, à savoir les phosphorites et phosphates sédimentaires, on doit examiner un cas plus discutable : c'est celui des affleurements métallifères. Il n'est pas douteux que le phosphore apparaît sur ces affleurements alors que la profondeur des filons ne le manifeste pas. C'est un de ces très nombreux faits qu'il est impossible d'interpréter simplement, comme on le faisait trop autrefois, par des conditions superficielles au moment de la cristallisation filonienne et dans lesquels des corps, non visibles dans la partie intacte d'un filon, se décèlent seulement dans sa partie altérée.

On peut, à première vue, en imaginer deux explications : concentration superficielle d'éléments qui, dans la profondeur, n'existeraient qu'à l'état de traces ; ou introduction par le dehors, soit par simple emprunt aux roches encaissantes, soit par un déplacement d'origine plus lointaine, comme il s'en produit dans les périodes d'émersion continentale. Il faudrait, pour trancher la question, des analyses très précises cherchant le phosphore dans la profondeur de ces gisements. Faute de telles analyses, le plus probable me paraît être aujourd'hui que ce phosphore des affleurements métallifères résulte surtout d'un apport extérieur. Il est à remar-

¹ Tome 2, pages 295 à 304.

quer cependant que, dans le départ profond du phosphore à l'état de fluo-phosphate de chaux, il y a eu entraînement fréquent de métaux, comme le plomb et surtout le groupe des terres rares, retrouvés ensuite dans les apatites. L'intervention des apatites plombifères aurait pu contribuer à donner du phosphore dans les gisements de plomb, où il a particulièrement l'apparence d'être originel.

Nous arrivons aux gisements sédimentaires, qui constituent la véritable forme pratique des concentrations phosphorées, devenues, par leur importance, industrielles.

Ces concentrations sédimentaires prennent, dans certaines régions, un développement qu'il importe d'évaluer en chiffres, si approximatifs que ceux-ci puissent être, pour discuter les possibilités relatives à leur mode de formation.

La plus grande de ces zones phosphatées actuellement connue est, ce semble, celle de l'Algérie et de la Tunisie. Les gisements mis en valeur n'en représentent qu'une très faible fraction. Cependant la Tunisie produit déjà plus de 1 800 000 t. de phosphate par an, représentant 1 MT de phosphate pur tricalcique, ou 200 000 t. de phosphore, et la seule compagnie de Gafsa est sûre de maintenir cette production plus d'un demi-siècle. On reste certainement au-dessous de la vérité en évaluant ce point de concentration à 10 MT de phosphore. Un gisement, comme le Djebel Onk, en renferme peut-être 40. Mais il ne s'agit là que de concentrations à teneur exceptionnelle. D'une façon plus générale, le suessonien phosphaté occupe au moins 10 000 km². S'il y avait 3 m. d'épaisseur à 33 p. 100, cela ferait 10 milliards de tonnes. Une estimation très approximative, montant, pour l'ensemble, à 5 000 MT, non pas de phosphates industriels, mais de phosphates tricalciques répartis, avec une teneur quelconque, dans une épaisseur quelconque de craie, ne doit pas être trop forte. On arrive ainsi à 1 000 MT de phosphore sédimenté dans le Nord Africain. En partant de roches à 1/1 000, il faudrait admettre la destruction d'environ 300 km³, ce qui n'a rien d'in vraisemblable, mais ce qui suppose néanmoins l'érosion très active d'une chaîne plissée.

Si nous prenons un autre exemple, pour lequel les chiffres sont plus précis, le bassin ferrifère de Meurthe et Moselle, avec ses 3 milliards de tonnes de minerais ferrugineux à 5/1 000 de phosphore, renfermerait près de 12,5 MT de phosphore.

La Floride a pu renfermer 200 MT de phosphates à 70 p. 100, ou 140 MT de phosphate pur, ou 28 MT de phosphore. La Caroline n'a pas dû en contenir plus de 4,5 MT.

Les 24 millions de tonnes de nos sables verts à 40 p. 100 donnent 1,7 MT de phosphore.

On peut envisager ce même problème sous une autre forme qui est peut-être plus parlante à l'esprit. Un phosphate riche à 60 p. 100 renferme 120 kg. de phosphore à la tonne. Une roche moyenne quelconque en contient 900 gr. Il a donc fallu, pour former ce phosphate, y concentrer la matière de 133 t. dans une. Quand on prend un minerai de fer de Meurthe-et-Moselle, on trouve de même que la concentration s'y est opérée, par rapport à une roche quelconque, dans la proportion de 7 à 1 pour

le fer et de 5 à 1 pour le phosphore. Ces chiffres, très voisins l'un de l'autre, sont à retenir pour aller au-devant d'une illusion que produit aisément l'optique industrielle et d'après laquelle on pourrait croire que la concentration, si capitale pour notre métallurgie, a été chimiquement beaucoup plus forte.

IV. — MODES DE CONCENTRATION DU PHOSPHORE

Comment s'est opérée, dans les sédiments phosphatés, la concentration qui les rend utilisables ? D'abord, par l'entrée en dissolution du phosphate; puis, généralement, par l'intervention des êtres organisés; enfin, plus localement, mais néanmoins dans des cas très fréquents, par une remise en mouvement nouvelle des sédiments phosphatés sous l'influence des eaux superficielles : remise en mouvement, aboutissant finalement à la constitution de gisements, où le phosphate tend peu à peu vers la teneur et la composition de l'apatite. Avant tout, il est nécessaire d'examiner ces trois points dans leur ensemble, sauf à revenir plus tard sur les caractères plus particuliers à tel ou tel type de gisements.

a) **Solubilité du phosphate de chaux.** — Cette solubilité, soit directement à l'état de phosphate tricalcique, soit par passage au phosphate d'ammoniaque, est le fait fondamental, sur lequel doit reposer toute théorie des gisements phosphatés. Le phosphate tend, en effet, sans cesse à se redissoudre tant qu'il n'a pas atteint sa forme la plus stable et de beaucoup la moins soluble, qui est l'apatite cristallisée. Ainsi peuvent progressivement se constituer, aux dépens de terrains contenant d'abord à peine quelques traces de phosphates, de véritables gisements phosphatés, à la condition que les réactions aient eu le temps de s'exercer. La solubilité du phosphate dans l'eau dépend absolument de la nature de ce phosphate et de la teneur en acide carbonique de cette eau, ou, accessoirement, de la présence de quelques autres sels, comme le chlorure de sodium en dissolution dans le réactif. Ainsi, tandis qu'il faut, pour dissoudre une partie d'apatite dans de l'eau saturée d'acide carbonique, à la pression et à la température ordinaires, 393 000 parties d'eau, 4 610 suffisent pour des os de bœuf frais et 1 789 pour du phosphate tricalcique récemment précipité. Pour dissoudre une partie de ce phosphate tricalcique, il faut : 30 000 parties d'eau pure, 20 000 d'eau légèrement salée, et 4 000 d'eau à 100 grammes de chlorhydrate d'ammoniaque par litre.

Dans les conditions ordinaires de la putréfaction, où l'acide carbonique se dégage abondamment, la dissolution des os est facile.

D'autre part, la quantité d'acide carbonique que l'eau peut dissoudre augmente à peu près proportionnellement à la pression et la solubilité du phosphate croît en même temps. L'eau, dans le fond des cavités souterraines, ou dans la profondeur des mers, arrive ainsi à agir comme un acide énergétique. Même dans les conditions tout à fait superficielles, la présence constante de l'acide carbonique et du chlorure de sodium ou du chlorhydrate d'ammoniaque dans les eaux détermine la solution du phosphate. Quand un cadavre se décompose, en dehors des ossements, la

chair elle-même fournit du phosphore sous la forme de phosphate d'ammoniaque engendré par l'activité bactérienne, et ce phosphate passe en dissolution.

b) Intervention des êtres organisés. — La faculté qu'ont les êtres organisés de puiser, dans des dissolutions très diluées, les substances qui leur sont nécessaires et de leur faire subir ainsi un premier stade de concentration a joué un grand rôle pour les phosphates. Le jour où ces organismes, quels qu'ils soient, se décomposent, ils rendent, en effet, à la circulation du phosphate beaucoup plus concentré qu'il n'était dans les terrains où eux-mêmes l'avaient indirectement puisé. S'il s'agit d'animaux marins, ce mode de concentration du phosphate a, pour formes particulièrement typiques, les dépôts sédimentaires de craies phosphatées, ou (à la suite d'une concentration intermédiaire) les nodules. Pour les animaux terrestres, il se constitue, de la même manière, des lits de guano donnant des phosphates comme ceux des cavernes, etc. Nous assistons aujourd'hui à des formations phosphatées de ce genre. Sans parler des phosphates des cavernes qui seront étudiés plus loin, dans les faibles profondeurs marines, entre 200 et 1000 m. de profondeur, du phosphate se forme couramment. C'est ce qu'ont montré, par exemple, les dragages du Challenger autour du banc d'Aguihas, au Sud du cap de Bonne-Espérance, le long d'une côte abrupte où ne débouche aucune rivière importante. Ailleurs, on retrouve des concrétions phosphatées marines renfermant jusqu'à 35 p. 100 de phosphate tricalcique dans certaines trainées de calcaire solide, formées par une accumulation de débris de petits polyptères, d'échinodermes et de mollusques qui se déposent aujourd'hui, entre 160 et 600 m. de profondeur, le long de courants chauds charriant des matières nutritives : par exemple, sur le parcours du Gulf Stream au large de la Floride. Mais la présence de récifs coralliens dans certaines craies phosphatées anciennes laisse supposer des profondeurs encore beaucoup plus faibles.

C'est par ces précipitations marines que se sont formées, en des zones littorales ou sublittorales, soit les concrétions phosphatées en nodules de nos terrains, soit les craies phosphatées, dans lesquelles le phosphate constitue surtout le ciment d'organismes divers (foraminifères du sénonien dans le Nord de la France, diatomées de l'éocène de Gafsa en Tunisie). On a quelquefois, à ce propos, imaginé des hétacombes de poissons, tués par exemple au passage d'un courant chaud dans un courant froid¹. Cette hypothèse ne semble nullement nécessaire et l'on ne doit pas oublier que les invertébrés à eux seuls peuvent fournir tout le phosphate nécessaire sans intervention des vertébrés.

En dehors de toutes les autres preuves, on peut considérer, comme une indication en faveur de l'origine organique, la présence fréquente de matières carburées accompagnant certains phosphates. En Tunisie, Thomas a signalé que certaines couches renfermaient jusqu'à 7 à

¹ Nous verrons que les dents de poissons abondent dans de nombreux gisements phosphatés, comme les craies du Nord de la France (p. 681), celles de Gafsa (p. 694), les gisements de la Floride (p. 692), etc. Voir aussi les bone-beds rhétiens (p. 668).

8 p. 100 d'une matière organique, qui leur donne une consistance grasse et onctueuse, mais qui n'est soluble ni dans le sulfure de carbone ni dans la benzine. La plupart des phosphates africains exhalent sous le marteau une odeur fétide tout à fait caractéristique. Les nombreux gisements de phosphates noirs siluriens ou dévoniens que nous allons décrire et, en particulier, ceux des Pyrénées françaises sont également caractéristiques à cet égard. Nous citerons des faits du même genre à Pernes, en Russie centrale, dans les nodules algériens, etc.¹.

Quand on regarde au microscope les craies phosphatées, on voit que le phosphate s'y présente sous forme de granules phosphatés entourant les grains de vase à globigérines qui forment la craie blanche ordinaire, et ces granules résultent eux-mêmes de la phosphatisation de débris organiques reconnaissables le plus souvent : moules de foraminifères, os, écailles, débris de poissons. De la présence de foraminifères non phosphatisés à côté de ces globules, on a voulu conclure que la phosphatisation avait commencé par se faire, comme pour les nodules, près du rivage; puis, que les éléments phosphatés avaient été entraînés un peu plus loin vers le large par les courants et s'y étaient mélangés en proportion assez constante dans la boue à globigérines². Avec les idées actuelles sur la faible profondeur à laquelle ont pu se déposer des craies, cette complication n'est pas nécessaire.

Nous aurons d'ailleurs l'occasion de revenir sur cette question à propos des craies phosphatées dans le sénonien du Nord de la France et dans l'éocène du Nord de l'Afrique.

c) **Remises en mouvement.** — Enfin les remises en mouvement jouent, dans la formation des gites phosphatés tels que nous les exploitons, un rôle tout à fait essentiel et sur lequel on ne saurait trop insister. Cette remise en mouvement prend, avant tout, une forme chimique : mais une préparation mécanique semble également être intervenue, comme nous allons le dire, dans la formation des nodules et s'être alors superposée à une première concentration réalisée sur place chimiquement.

Cette remise en mouvement se traduit d'abord par la dissolution du phosphate contenu dans un des gites précédents et par sa reprecipitation sur des centres d'attraction, qui peuvent être des éléments quelconques, mais qui sont souvent déjà des matériaux phosphatés, nourris et accrus par là. C'est ainsi que, dans les gisements de phosphate, si l'on rencontre des ossements, ce qui est fréquent, on les trouve plus riches en phosphate qu'ils ne l'étaient originairement. De même nous citons tout à l'heure, dans les craies phosphatées, les organismes divers qui ont été phosphatisés, imprégnés de phosphates dans les détails les plus fins de leur structure. Dans les nodules, il existe fréquemment des débris d'os ou de coquillages, etc. On a, dans tous ces cas, souvent admis que l'organisme avait fourni le phosphate au milieu duquel on le trouve ;

¹ Pages 675, 676, 688.

² D'après Murray et Renard, il se forme actuellement, dans la boue à globigérines des mers profondes, des concrétions de phosphate de chaux (sans fluorure de calcium) provenant de la décomposition des ossements de vertébrés.

la vérité est qu'il a pu sans doute en fournir une partie, mais qu'il en a plus reçu que donné.

Quand il s'agit des nodules, on est amené à faire, en outre, intervenir une sorte de préparation mécanique. Assurément les nodules ne sont pas de simples galets; mais ils témoignent pourtant de frottements, qui les ont arrondis, usés et polis les uns contre les autres. Quelquefois la précipitation chimique et le roulement semblent être des épisodes simultanés d'une même sédimentation, comme cela se réalise encore pour les nodules phosphatés du banc d'Agulhas. Souvent aussi il semble que les eaux soient revenues sur un continent émergé, où s'étaient produites des concentrations chimiques de terrains phosphatés par altération superficielle et qu'elles aient déplacé, roulé, rassemblé en un lit des fragments de ces terrains déjà enrichis préalablement en phosphate. L'existence fréquente, dans les phosphates sédimentaires, d'ossements auxquels on peut attribuer un âge antérieur, trouverait là une explication naturelle (Tennessee, Sandy et Ely en Angleterre, Caroline, Floride, et peut-être même Gafsa). La forme absolument sphérique de certains phosphates primaires (Podolie, etc.) semblerait également accuser un tourbillonnement dans des vasques.

En tout cas, nous allons voir de nombreux exemples d'enrichissements phosphatés réalisés à la surface des continents. Etant donné que la plupart des terrains contiennent un peu de phosphate, ce qui s'explique aisément par les organismes recueillis pendant leur formation, une altération suffisamment avancée de terrains presque quelconques peut aisément fournir une sorte de gisement phosphaté par élimination progressive du carbonate de chaux. A plus forte raison s'il s'agit de terrains déjà phosphatés, ou de matières organiques à phosphates. La concentration phosphatée nous apparaît alors comme liée surtout à une manifestation continentale. Presque tous les gisements phosphatés témoignent ainsi d'un enrichissement notable sur leurs affleurements.

D'autre part, le déplacement et la concentration des phosphates par des circulations aqueuses, soit froides, soit même exceptionnellement thermales, paraît avoir été assez fréquemment réalisé avec intervention d'acide carbonique et nous rattachons à cette origine bien des formations phosphatées qui affectent plus ou moins l'allure filonienne. C'est ainsi qu'ont dû se produire en Tunisie certains alternances de calamine et de phosphorite¹. Les phosphates riches de Palestine, associés sous une forme filonienne à des niveaux sédimentaires de phosphates plus pauvres, nous montrent avec clarté l'origine d'un phénomène, dont nous verrons des cas particulièrement typiques pour les sables phosphatés de la Somme, les phosphates de la Caroline ou de la Floride, les phosphorites du Quercy et du Nassau, les affleurements de l'Auxois, etc.

Assez fréquemment, il se produit, en même temps, une silicification qui se traduit par des cristallisations de quartz dans l'Estramadure, par le développement de bancs siliceux en Palestine².

¹ Voir t. I, p. 708. Voir également plus loin (page 714) des cas de sources thermales tenant du phosphate en dissolution.

² C'est le même phénomène qui rend également plus siliceux à la base les autres gîtes d'altération continentale, oxydes de manganèse, barytine, kaolin, alunite, etc.

V. — DIVERSES CATÉGORIES DE GISEMENTS¹

Le phosphate de chaux existe, à l'état d'*apatite* cristallisé, sous la forme d'inclusions, ou de filons en relation avec des roches ignées : inclusions et filons, dont nous donnerons une courte description en raison de

¹ Il a été écrit des bibliothèques entières sur cette question des phosphates. Nous ne mentionnons ici que les articles principaux.

1843. GIRARDIN et PREISSER. *Mémoire sur les os anciens et fossiles* (Ann. Ch. et Ph., t. 3, p. 370). — 1844. FOWNES. *On the existence of phosphoric acid in rocks of igneous origin* (London philos. transactions, t. 1, p. 53). — 1855. MEUGY. *Sur la découverte du phosphate de chaux en France* (Ann. des M., 5^e série, t. 11, p. 149). — 1855. FRÉMY. *Recherches chimiques sur les os* (Ann. Ch. et Ph., t. 1, p. 47). — 1856. ELIE DE BEAUMONT. *Etude sur l'utilité agricole et les gisements géologiques du phosphore* (Moniteur universel et Mém. de la Soc. d'Agric.). — 1857. DELANOÛRE. *Sur l'utilité du phosphore pour l'amélioration de la terre végétale* (B. S. G. F., 2^e série, t. 14, p. 899). — 1868. DAUBRÉE. *Sur la découverte et la mise en exploitation de nouveaux gisements de phosphate de chaux* (Ann. des M., 6^e série, t. 13, p. 67). — 1877. BRYLINSKY et LIONNET. *Phosphates de chaux fossiles* (Soc. géol. de Norm., t. 4, p. 3). — Dr VÖELCHER. *On the chemical composition of phosphatic minerals for agricultural purposes* (Journ. of the Roy. agric. Soc., n° 22, part. 2). — 1877-78. LIONNET. *Phosphates de chaux fossiles ; géologie et origine* (Bull. Soc. linn. de Norm., 3^e série, t. 2, p. 351. Caen). — 1879. J. BRUNFAUT. *Des phosphates et des produits chimiques propres à l'agriculture* (In-8°, 102 pages. Paris). — 1879. DELESSE, CHEVREUL, CHATIN et BARRAL. *Sur quelques gîtes de phosphates exploités par l'agriculture* (Bull. de la Soc. nat. d'agric. de France, t. 39, p. 58-59). — 1880. NIVOIT. *De l'acide phosphorique dans les terrains de transition et dans le lias des Ardennes* (B. S. G. F., t. 8, p. 357). — 1884. NIVOIT. *Gis. de phosphate de chaux* (Enc. chim. Frémy, t. 5). — 1884. DIEULAFAIT. *Origine de certains phosphates de chaux en amas dans les calcaires de la série secondaire et de certains minerais de fer appartenant à la division des minerais en grains* (C. R., t. 97, p. 841). — 1884. DIEULAFAIT. *Origine et mode de formation des phosphates de chaux en amas dans les terrains sédimentaires* (C. R., t. 99, p. 813). — 1885. GRANDEAU. *Recherches sur les phosphates* (C. R., t. 100, p. 1184). — 1887. *Statistique de l'industrie minérale en France en 1886*. — 1887. FUCHS. *La constitution des gîtes de phosphate de chaux* (Assoc. franç. pour l'avancement des sciences. Congrès de Nancy). — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souterraines aux époques anciennes*, p. 114, etc. — 1888. PENROSE. *Nature and origin of deposits of phosphate of lime*. — 1888. *The nature and origin of deposits of phosphate of lime* (Bull. of the U. S. géol. Suiv.) Cet ouvrage contient une bibliographie détaillée. — 1889. *Exploitation des phosphates de chaux en France* (Statist. de l'ind. Minér., p. 52). — 1889. GRANDEAU. *L'épuisement du sol et les récoltes* (Petite Ency. agricole. Chez Hachette). — 1889. PENROSE. *Nature et origine du phosphate de chaux* (Soc. géol. du Nord, t. 16. Lille). — 1889. EUGÈNE RISLER. *Carte géologique et statistique des gisements de phosphate de chaux exploités en France*. — 1889. REVAUX. *Les gisements de phosphate de chaux* (Bull. Ecole des Mines, août, p. 231). — 1889. OLVY. *Le phosphate de chaux*. — 1891. RENARD et CORNET. *Sur la nature et l'origine des phosphates de chaux de la craie* (Soc. géol. du Nord, 4 février). — 1891. WYATT. *The phosphates of America* (New-York). — 1892. CARNOT. *Recherche du stuur dans les os modernes et fossiles et dans différentes variétés de phosphates naturels* (C. R., 2 et 23 mai ; 25 juillet 1892 ; Ann. d. M., 9^e, t. 3, p. 155). — 1892. HUBERT. *Phosphates de chaux naturels* (Chez Baudry). — 1892. MÜNTZ. *Les phosphates dans l'agriculture française* (R. d. Deux M., 15 août). — 1894. A. GAUTIER. *Sur un gisement de phosphates de chaux et d'alumine* (Ann. d. M., 9^e, t. 5, p. 1-52 ; cf. C. R. mai-juin 1893). — 1895. CREDNER (C. R. Z. pr. G., p. 462). — 1895. LEVAT. *Etude sur l'industrie des phosphates et superphosphates* (Ann. des m., 9^e, t. 7, p. 5 à 260 ; cf. 1894. *Etat actuel de la prod. et de la consom. des phosphat.* (Assoc. franç. Congrès de Caen. 13 p.). — 1896. AD. CARNOT. *Sur les variations observées dans la composition des phosphates* (Ann. d. M., 9^e, t. 10, p. 180). — 1896. LASNE. *Etude sur les phosph. nat.* (Rap. au Congrès intern. de chimie apl., in-8°, 68 p.). — 1895. CARNOT. *Sur la compo-*

leur intérêt métallogénique et quoiqu'actuellement ces gisements fournissent à peine 2 ou 3 000 t. par an sur un total de 5 500 000 t. On le trouve, d'autre part, dans les terrains sédimentaires, sous deux formes principales, dont nous aurons à étudier l'origine : *rognoles* ou *nodules*¹ composés de phosphate tricalcique avec carbonate de chaux et *craies phosphatées*.

Les craies et les nodules sont aujourd'hui les seules sources pratiques de phosphates. Leurs gisements sédimentaires seront étudiés dans l'ordre de leur âge géologique.

Enfin il existe des gisements où l'apatite compacte se présente sous une forme concrétionnée, radiée, mamelonnée, stalactiforme, mélangée de silice, à laquelle on a donné le nom de *phosphorite*. Certains de ces gisements, qui présentent des types très spéciaux, ont été considérés, par tous les auteurs, comme des filons concrétionnés hydrothermaux d'origine interne. Nous les décrirons néanmoins avec les phosphates sédimentaires d'âge tertiaire, auxquels ils nous paraissent se rattacher.

sition des cristaux observés dans les scories de déphosphoration. Sur un gisement de phosphates d'alumine et de potasse trouvé en Algérie et sur la genèse de ces minéraux. Sur la composition de quelques phosphates d'alumine (wawellites, turquoises, odontolites) (Ann. d. M., 9^e, t. 8, p. 306 à 329). — 1902. STAINIER. *Bibl. gén. des gisements de phosphates*, 2^e éd. (Ann. d. M. de Belgique, t. 7, p. 67-68). — 1905. JUMEAU. *Les phosphates de chaux*. — 1905. LÉON-W. COLLET. *Les concrétions phosphatées de l'Agulhas Bank* (Proc. R. Soc. Edinburgh, 10, p. 862-893). — 1909. AGUILLON. *L'industrie des phosphates minéraux* (Ann. d. M. mai).

Voir, en outre, pour quelques gisements non décrits :

1878. GAMPER. *Alpine phosphate* (Jahrbuch der K. K. geol. Reichsanstalt, t. 28, n^o 4, p. 611. Vienne). — 1878. P. GUYOT. *Sur deux gisements de chaux phosphatée dans les Vosges* (C. R., t. 87, p. 333). — 1879. K. MARTIN. *Phosphoritische Kalke von der Westindischen Insel Bonaire* (Zeits. der D. geol. Ges., t. 31, p. 473). — SALLY. *On apatite from Levant mine, Cornwall* (Tr. geol. Soc. of Cornwall, t. 10, p. 240. Penzance). — 1879. WICKERSHEIMER. *Note sur un gîte de phosphate de chaux situé près de Cette* (Ann. des M., 7^e série, t. 16, p. 283. Paris). — 1881. HEUSLER. *Ueber ein Phosphorit Vorkommen am Steinrother Kopf*. (Verh. des Nat. Ver. 4^e série, t. 8, n^o 1, Bonn). — 1881. STRENG. *Ueber die Phosphate von Waldgirmes* (N. J. f. Min., nos 1-2 du t. 1, p. 101. Stuttgart). — 1884. E.-A. SMITH. *Cretaceous phosphatic in Alabama* (Science of Cambridge U. S. A., t. 3, p. 586). — 1884. DELVAUX. *Découverte de gisements de phosphate de chaux appartenant à l'étage yprésien dans le sous-sol de la ville de Renaix et dans celui de la région de Flobecq* (Ann. Soc. geol. belge, t. 11, p. 279). — 1884. WILL-KING. *Phosphatic rocks at Masuri* (Rec. geol. surv. of India, vol. 17, p. 192). — 1884. JEANJEAN. *Notice géologique et agronomique sur les phosphates de chaux du département du Gard* (In-8^o de 46 pages). — 1885. MALLET. *Analyses of phosphatic nodules and Rocks from Mussoree* (Rec. geol. surv. of India, vol. 18, p. 126). — BOURSALT. *Craie phosphatée des falaises de Dieppe* (Le Naturaliste, n^o 60). — 1895. H. CHEDNER. *Die Phosphoritknollen des Leipziger Mitteloligocäns und die Nord-Deutschen Phosphoritizonen* (Abh. d. Mat. Phys. Cl. d. K. Sachs. Ges. d. Wis., 22, 46 p.). — 1895. SMITH. *Les phosphorites de l'Alabama* (Tr. Am. I. Allanta meeting; C. R. Z. f. pr. G., 1896, p. 160). — 1897. VATER. *Das Alter der Phosphoritlager der Helmsledter Mulde* (Z. d. D. geol. Ges., 49, p. 628-635).

¹ Pendant longtemps, ces nodules ont été, à tort, assimilés à des coprolites. Ce sont, en réalité, des concrétions phosphatées, auxquelles un reste organique (débris de spongiaire, coquille de mollusque, etc.) rempli de vase crayeuse, a servi de centre.

α — INCLUSIONS D'APATITE

(NORVÈGE, CANADA, MONTEBRAS, CAP DE GATE)

Nous avons déjà fait remarquer combien l'apatite est fréquente dans les roches éruptives, où elle se présente essentiellement comme un minéral de première consolidation. On la trouve, à l'état microscopique, dans les roches les plus diverses, presque toujours en inclusion dans d'autres minéraux, même dans le fer oxydulé. Dans ce cas, elle a donc dû cristalliser à haute température, souvent en présence de silice en excès. On peut, en outre, noter ce fait que les variétés vertes, comme celles du Canada, contiennent des inclusions à deux liquides, eau et acide carbonique.

Les roches les plus riches en apatite microscopique sont presque toujours aussi très riches en mica noir ou en amphibole. C'est ainsi que nous aurons à étudier les gabbros à apatite norvégiens, dont dérivent plus ou moins directement les groupements d'apatite, enstatite, hornblende et mica noir exploités à Oddegården en Norvège. Dans ce cas, comme pour les pyroxénites à apatite du Canada étudiées ensuite, on croit déjà reconnaître l'influence minéralisante des granulites. Ailleurs, c'est franchement dans de telles granulites, dans les quartz connexes, ou dans d'autres roches acides à structure microlithique que l'on trouve l'apatite en grands cristaux : granulites de Gellivara ; filons stannifères de Montebbras ; trachytes du Cap de Gate, etc. Nous décrirons sommairement les plus typiques de ces gisements.

A. — APATITES ASSOCIÉES A DES GABBROS ET PEGMATITES

Oddegården, Gellivara¹. — On peut considérer comme des gisements d'apatite en roche les filons très développés sur la côte Sud-Est de Norvège, entre Langesund (Bamle) et Lillesand, où l'on trouve l'apatite associée à divers minéraux : amphibole, enstatite, mica noir, avec lesquels elle forme, non pas des filons concrétionnés à la façon des filons métallifères, mais des sortes de roches filoniennes.

¹ Coll. Ecole des Mines, 1508 et 1744. — Gisement visité en 1890. — Ces gisements ont été plus longuement décrits dans les *Gîtes métallifères*, t. 1, p. 329 à 335 et j'ai donné également une étude générale sur la question des phosphates norvégiens dans les *Minerais de fer scandinaves* (Ann. des M., juillet 1903, p. 124 à 141). — Voir encore : 1874. HELLAND. *Apatit forekomster* (Geol. för. i Stockholm). — 1875. BRÖGGER und REUSCH. *Vorkommen des Apatit in Norwegen* (Deuts. Geol. Ges., p. 646 avec bibl.). — 1878. MICHEL LÉVY. *Sur la roche à Wernérite de Bamle* (Bull. Soc. Min., p. 43 et 79). — 1883. SJØGREN. *Apatites de la côte d'Arendal* (Geol. för. de Stockholm, avril, n° 81, p. 447 ; 1884, n° 87, p. 177, discussion). — 1887. LACROIX. (C. R., t. 104, p. 1011 (Dipyre de Saint-Nazaire)). — 1889. LACROIX. *Contribution à l'étude des gneiss à pyroxène et des roches à wernérite* (Soc. de Min., avril). — 1891. J.-W. JUDD. (Min. mag., t. 8). — 1895. VOGT. (Z. f. pr. G., p. 367 à 370, 444 à 439, 465 à 470, avec bibl. ant.).

Tous ces gisements se rattachent à des gabbros, ordinairement à des hypérites à olivine de structure granitique, soit en stockwerks dans la roche, soit à son voisinage immédiat dans les schistes archéens. Ils occupent une zone d'environ 110 km. de long sur 25 km. de large.

Ces apatites sont toujours des chlorophosphates à teneur en chlore atteignant 5 p. 100, et non des fluophosphates, comme la plupart des autres apatites, notamment celles du Canada. Les minéraux fluorés font à peu près défaut dans leur groupement; mais on trouve parfois des traces de cérium, lanthane, didyme, etc., souvent aussi un peu de carbone.

Les filons renferment, comme éléments constants, l'enstatite (très abondante), la hornblende, le mica magnésien, parfois un phosphate de magnésie fluoré, la kjerulfine; fréquemment, on y trouve des minerais titanés et de la magnétite, de la pyrite et de la chalcoppyrite.

Ces divers minéraux atteignent des dimensions qui prouvent une cristal-

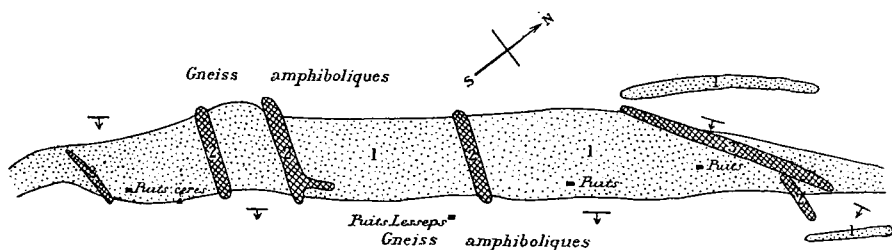


Fig. 94. — Carte des environs d'Oddegården, d'après A. Lacroix.

1, gabbro traversé par les filons d'apatite et transformé en diorite à dipyre. — 2 et 3, granulite.

lisation lente et tranquille. Leur groupement, souvent confus, peut offrir une structure concrétionnée ou même zonée.

Un des gisements de cette région, celui d'*Oddegården*, a été l'objet d'une petite exploitation depuis 1871. Il est situé près Bamble, à 12 km. du port de Langesund. La production était, en 1890, de 5 000 t.; elle est tombée ensuite presque à zéro. En 1901, l'ensemble de la Norvège n'a produit que 738 t. d'apatite; puis 348 t. en 1906; 1830 t. en 1907; 1771 t. en 1908.

La région d'Oddegården comprend des schistes et quartzites cambriens, des terrains siluriens et peut-être un peu de dévonien, près de Langesund. Au-dessous de cette série primaire, vers Tungevald, on entre dans des schistes micacés et amphiboliques à grenats, avec des amphibolites, des pyroxénites, des gneiss à wernérite¹ et des gneiss à cordiérite que traversent des porphyrites.

Enfin, à Oddegården même, on trouve, recoupant ce système gneissique, un massif éruptif d'environ 100 m. de large et 800 m. de long, dirigé à 60°, qui paraît avoir été constitué originairement de gabbro noir,

¹ A. Lacroix, qui a spécialement étudié ces gneiss à wernérite, les considère comme un produit de métamorphisme de cipolins, probablement sous des actions granulitiques (1889, *loc. cit.*, p. 33 et 183). Nous verrons que le gabbro, au voisinage de l'apatite, s'est chargé de wernérite sous une action minéralisatrice qui semble analogue.

dont on voit quelques îlots subsistant de 10 à 20 m. de diamètre, mais qui aujourd'hui se présente presque partout sous forme d'un gabbro à wernérite ou dipyrddiorite (fig. 94). La présence de l'apatite est en relation intime avec celle de la wernérite, qui résulte elle-même d'un métamorphisme ayant probablement déterminé l'introduction de chlorures sodique et calcique. A Oddegården, le gabbro apparaît toujours, au contact de l'apatite, sur une épaisseur d'au moins 0,50 m. à 2 m., transformé en dipyrddiorite.

Il y a donc lieu d'étudier cette production de gabbro à wernérite.

A. Lacroix a montré que le changement commençait par la transformation du pyroxène en amphibole : puis, dans le feldspath, se produisent des grains arrondis de dipyre qui, peu à peu, arrivent à constituer toute la masse. En même temps s'introduisent dans la roche même 2 à 5 p. 100 d'apatite, tandis que le gabbro ordinaire semble, d'après les calculs de J. Vogt, avoir seulement la teneur ordinaire en phosphate de ce genre de roche (0,26 p. 100). On peut donc se demander si la formation de

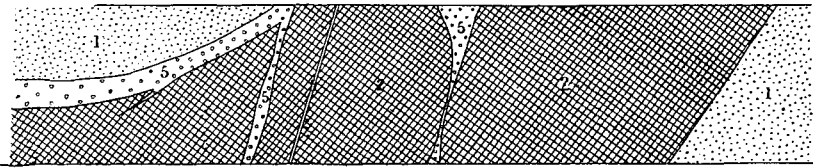


Fig. 95. — Coupe d'une galerie de mine à Oddegården.

1, gabbro transformé en diorite à dipyre. — 1', gabbro. — 2, granulite. — 5, apatite.

l'apatite n'est pas ici, comme dans le groupe de gisements étudiés plus loin, en rapport plutôt avec la veine granutilisante et métamorphisante qu'avec le gabbro originel. On croit, en effet, dans la région de Kragerø, qu'il faut surtout chercher des filons d'apatite à proximité de la granulite.

En dehors du gabbro et du dipyrddiorite, on trouve, aux environs immédiats d'Oddegården, comme autres roches éruptives, de la granulite et de la porphyrite. La granulite, pauvre en mica blanc, constitue, au milieu du gabbro, cinq masses principales, accusant des venues successives qui se recoupent mutuellement avec rejets.

La porphyrite recoupe, au contraire, toutes les autres roches du pays¹.

Les filons d'apatite présentent des directions diverses et des inclinaisons très variables. Ceux qu'on a exploités avaient, en général, de 20 à 25 cm.; mais on en a trouvé cinq qui dépassaient 1 m. Les variations d'épaisseur, tant en direction qu'en inclinaison, sont constantes ; après un renflement de 3 m. d'épaisseur qui se sera prolongé (au maximum) sur 40 m. de large et 40 m. de long, on n'aura plus que l'épaisseur d'un joint, parfois même sans apatite.

Leur remplissage comprend, cristallisés en désordre et sans succession déterminable : apatite, hornblende, enstatite et mica noir à grand cristaux.

¹ La fig. 96 montre la porphyrite recoupant l'apatite.

Le seul fait presque constant, c'est l'existence, aux épontes, de deux zones de mica noir, toujours à petits feuilletés. Ces épontes sont toujours fort nettes et présentent le plus souvent des salbandes; rarement il existe, sur quelques centimètres le long du filon, une sorte de passage progressif, de fusion avec la roche; mais on n'a jamais rien rencontré qui ressemblât à une concrétion ou à une druse.

En moyenne, on a exploité des parties tenant 50 p. 100 de mica, 40 p. 100 d'apatite et le reste en enstatite et hornblende: mais on a trouvé exceptionnellement des masses d'apatite pure. La rencontre de deux filons, l'un plat, l'autre vertical, produit habituellement un enrichissement en apatite.

Comme minéraux exceptionnels, on trouve de la wagnérite assez abondante avec de la monazite, des pyrites de fer et de cuivre, du fer titané; le quartz n'existe pour ainsi dire pas dans les filons exploités; mais la région renferme d'autres filons où l'apatite est associée au quartz.

Ces filons à apatite recourent le gabbro et s'arrêtent, en général, devant

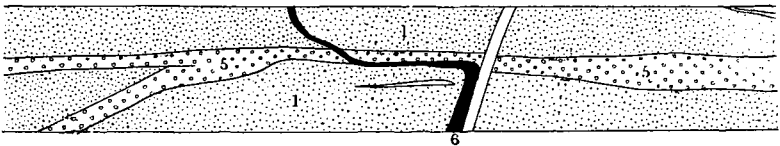


Fig. 96. — Coupe d'une galerie de mine à Oddegården, d'après A. Lacroix.

1, gabbro. — 2, granulite. — 5, apatite. Un filon de porphyre 6 est marqué en noir; il longe, en partie une faille à remplissage calcaire.

les grandes masses de granulite, dont ils semblent à peu près contemporains; car ils traversent, d'autre part, des veines de granulite latérales (fig. 95 et 96).

Le cas d'Oddegården, que nous venons d'étudier, est très loin d'être unique. Le développement de l'apatite en grosses masses est fréquent dans toute la Norvège et nous avons eu l'occasion ailleurs de l'étudier tout spécialement à propos des minerais de fer de Gellivara, Kirunavara, etc.

A *Gellivara-Dundret*, comme à Oddegården, l'apatite, associée aux mêmes minéraux (fer titané, rutile, sphène, hornblende, etc.), se trouve de préférence dans des gabbros (hypérites à olivine), ou à leur contact immédiat, et l'on a observé une transformation en wernérite des labradors dans la zone de salbande.

D'après la description de H. Lundbohm¹, le gabbro du Dundret comprend plagioclase, diallage, pyroxène rhombique, olivine, accessoirement magnétite, ilménite et leucoxène. Il passe, vers le Nord, à un granite à hornblende spécial avec intercalation de schistes amphiboliques, dans lequel se trouvent, en divers points, mais surtout à environ 100 m. de la limite du gabbro (3,5 km. de Gellivara), des filons de feldspath, quartz, apatite, hornblende et parfois sphène ou rutile avec wernérite.

¹ *Apatit förekomster i Gellivare Malmberg*, p. 8.

Sur l'un de ces filons, par exemple, une veine large de 10 à 15 cm., composée surtout de feldspath avec quelques autres minéraux, renferme des noyaux d'apatite atteignant 0,60 m. de long et 0,12 m. de large.

Parmi les filons de pegmatite à apatite assez nombreux, que l'on peut observer dans le district de Gellivara, le principal se trouve à Vålkomman et constitue, près des gisements de fer, un amas de 2,40 m. de large sur 4 m. de long, prolongé au Nord par un certain nombre d'apophyses plus minces et atteignant, en définitive, 12,50 m.

La pegmatite, composée de plagioclase rouge et d'orthose avec quartz, y renferme souvent de l'oligiste en grands cristaux avec des nids d'apatite. Le minerai d'hématite, au voisinage, contient de nombreuses veinules de pegmatite à cristaux d'apatite, sans lien visible avec cette grosse masse; mais l'hématite elle-même est, dans sa masse, assez pauvre en apatite.

On a quelquefois vu, dans la formation de tels filons à apatite, un simple produit de sécrétion secondaire, ayant emprunté son phosphore aux roches ou terrains recoupés. Peut-être serait-il plus exact d'attribuer, au contraire, une influence très locale dans la phosphoration des minerais à l'influence de ces filons.

En même temps qu'ils sont recoupés par des veines pegmatiteuses à apatite, un grand nombre des gisements de fer scandinaves, notamment ceux de Laponie et de Grängesberg, renferment une proportion notable de phosphore incorporée dans leur masse, souvent à l'état de phosphate de chaux, cristallisé individuellement côte à côte avec la magnétite ou avec l'hématite. Il paraît probable que ces phosphates, dont nous reparlerons, ont eu principalement une origine sédimentaire¹.

En résumé, il semble résulter de cet examen que les apatites scandinaves constituent, pour la plupart, soit directement à partir des gabbros, soit à partir des granulites, un départ analogue à celui que l'on observe, pour l'étain, le long des granites à muscovite: départ amené sous l'influence, tantôt des chlorures, comme en Norvège, tantôt, ailleurs, de chloro-fluorures, ou simplement de fluorures. La richesse spéciale en filons phosphatés de certains champs de gabbros tiendrait, avant tout, à l'abondance particulière de ces fumerolles, qui, ailleurs, auraient manqué pour extraire et concentrer localement le phosphore, dispersé de même dans la masse entière du gabbro².

Ajoutons que ce départ, exécuté dans un stade postérieur à l'intrusion même et probablement à la cristallisation des gabbros, paraît, dans tous les cas, avoir une relation avec la présence des granulites, qui recourent ces roches: relation qui rapproche un peu plus encore l'apatite du groupe stannifère et qui correspond avec la présence si fréquente d'apatite, soit dans les granulites, soit dans les filons d'étain eux-mêmes, ainsi que nous allons le dire bientôt. En même temps, on explique ainsi

¹ Voir plus loin page 661.

² Des calculs de Vogt (*Zeits f. pr. Geol.*, 1895, p. 459) semblent montrer que la proportion totale d'acide phosphorique dans le gabbro d'Oddegården (environ 3 p. 100) n'est pas supérieure à celle que l'on peut constater dans d'autres gabbros.

comment la venue d'apatite dans le gabbro se traduit par un apport de chlorures, qu'il semble difficile de supposer directement empruntés au gabbro lui-même (où ces chlorures n'apparaissent plus à l'état normal), du moins sans intermédiaire profond.

Canada¹. — L'apatite se trouve en masses importantes au Canada : 1° dans le comté d'Ottawa, province de Québec ; 2° dans la région située au Nord-Est du lac Ontario (province d'Ontario) (fig. 97).

Les apatites semblent se trouver là en lentilles au milieu de pyroxénites associées à des cipolins. D'après les dernières études, ces pyroxénites

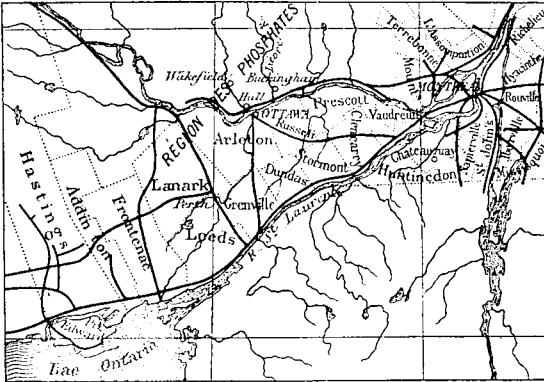


Fig. 97. — Carte de la région des phosphates du Canada.

seraient une forme métamorphisée de gabbro intrusif, plus acide que celui de Norvège, avec orthose et quartz². On y trouve la fluorine accusant le rôle du fluor, qui se manifeste d'autre part dans la composition de ces apatites, le quartz, la hornblende, le graphite, etc. Parfois les cristaux d'apatite sont englobés dans du calcaire métamorphique. L'apatite est associée,

¹ Coll. Ecole des Mines, 1741, 1799, 2975. — 1866. STERRY HUNT. *Exploration géologique du Canada*. — 1873-78. VENNOR et HARRINGTON. *Revue géologique d'Ottawa*. — 1879. HARRINGTON. *On the minerals of some of the Apatite bearing veins of Ottawa County* (Montreal). — 1882. MACKINTOSH. *The mineral resources of Canada*. — 1884. TORRANCE. *Apatite deposits of Ottawa County* (Québec). — 1884. ADAMS. *On the occurrence of the norwegian « Apatitbringer » in Canada with a few notes on the microscopic characters of some laurentian Amphibolites* (Rep. of the 54^e meet. of the Br. As. for the Ad. of Sc., p. 717). — 1884. BROWN. *The Apatite deposits of the Province of Québec* (*ibid.*, p. 719). — 1885. MENITT. *Economic minerals of Canada*. — 1885. OBALSKI (Bull. de l'Ec. des Mines, p. 116 et 138). — 1885. KINAHAN. *Notes on the Apatite of Buckingham Ottawa County* (J. of the r. geol. Soc. of Ireland, nouv. série, t. 7, p. 1. The sc. proc. of the Dublin Soc., t. 4, p. 347). — 1886. STERRY HUNT. *The Apatite deposits of Canada* (The Canadian record of Science, vol. 1, p. 65. Montréal et Amer. As. for the Ad. of Sc., 34^e meeting, p. 199). — 1889. ADAMS et LAWSON. *Canadian report of science*. — 1890. LADUREAU. (La Nature, 13 déc.). — 1891. WYATT. *The phosphates of America*, p. 27. — OBALSKI. *Rapports géol. ann. sur la prov. de Québec*.

² Voir au tome 2, fig. 289, p. 588, une carte plus générale des gisements canadiens, avec une étude des norites nickélicifères de Sudbury, qui passent au granite à micropegmatite.

comme en Norvège, à des minéraux cristallisés, mais en moindre proportion; en revanche, le zircon est plus abondant. Les éléments magnésiens ne jouent qu'un rôle tout à fait subordonné. La wernéritisation existe au contact, mais sur une échelle moindre. Obalski attribue les apatites à une remise en mouvement pendant le métamorphisme; Reusch et Brögger à des venues filoniennes indépendantes.

Le minerai, d'ordinaire très pur, se présente habituellement en masses cristallines formant parfois une sorte de sable grenu, ou encore en cristaux hexagonaux pyramidés bien définis, dont quelques-uns atteignent des dimensions remarquables (cristal de 400 kg. au musée d'Ottawa). Sa couleur est rouge ou verte, allant du vert très foncé au vert très clair, presque blanc, la couleur ordinaire étant vert émeraude intermédiaire. Il n'est jamais phosphorescent.

Sa composition correspond à environ 90 p. 100 de phosphate tribasique de chaux, 8 de fluorure de calcium, 0,4 de chlorure de calcium et un peu de résidu insoluble. Elle se différencie des apatites de Norvège qui sont beaucoup plus chlorurées (environ 2 p. 100 de chlorure de calcium).

On a exploité principalement :

Sur la rivière du Lièvre, — la mine d'*Emerald Mine* (Buckingham) (Gisement régulier de 10 à 15 m. de puissance. Exploitation à ciel ouvert); — celle de *Little Rapid Mine* (Veine régulière de 4 m., avec puits de 60 m.); — celle de *North Star Mine* (Veine de 3 à 5 m. de puissance); — *Union phosphate Mining de Phosphate of Lime*, etc.;

Dans Templeton, celles de *Blackburn*, *Jackson*, *Canada Industrial C^o*, et de *Templeton and Blanche River Phosphate C^o*.

Production. — Ces apatites du Canada ont eu, un moment, une certaine importance industrielle, alors que les grands gisements de phosphates sédimentaires n'avaient pas encore submergé le marché. On les recherchait pour la fabrication des superphosphates en raison de leur haute teneur, dont la constance permettait de passer des marchés à 80 p. 100 et pour l'absence de fer et d'alumine. Partie de 3 000 t. en 1878, la production atteignit 28 000 t. en 1889. En 1892, on ne put exporter que 8 000 t. Depuis 1901, le Canada oscille entre 700 et 1 000 t. par an.

Montebras (Creuse)¹. — Nous citons ce gisement comme exemple d'apatite en masses notables associée à des pegmatites de gisements stannifères.

On trouve, dans la granulite stannifère de Montebras, un stockwerk de filons, où tantôt s'est concentrée l'apatite, tantôt un autre phosphate, l'amblygonite, ailleurs encore, dans les mêmes conditions, la cassitérite. Ces filons renferment parfois de gros blocs d'apatite utilisables; mais, en outre, il existe des greisen contenant de petits cristaux disséminés d'apatite bleue dans des conditions analogues à celles que nous allons trouver pour les trachytes du cap de Gate.

¹ 1900. L. DE LAUNAY. *Excursion à quelques gîtes minéraux et métallifères*, p. 10 à 16 (Congrès géologique intern.).

B. — TRACHYTE A APATITE DU CAP DE GATE (Espagne)¹

Le *cap de Gate* est situé à la pointe Sud-Est de l'Espagne. Là, notamment dans la petite colline de Jumilla, sur une étendue de 22 hectares. l'apatite forme de nombreux cristaux jaune de miel ou vert clair, irrégulièrement disséminés dans une pâte rouge trachytique.

La roche a une teneur en phosphate qui varie de 7 à 30 p. 100 et qui atteint, en moyenne, près de 15 pour 100. De plus, elle renferme jusqu'à 8 et 10 p. 100 de potasse, utile de son côté pour les cultures et sa décomposition à l'air est assez rapide pour que l'apatite puisse être isolée par criblage sans trop de frais. On a, dès lors, songé à l'employer comme amendement.

β. — PHOSPHATES SÉDIMENTAIRES

Généralités. — Nous allons trouver des phosphates sédimentaires appartenant aux étages géologiques les plus divers depuis l'archéen jusqu'à l'actuel. Il y a probablement lieu de rattacher ces formations à certaines conditions de sédimentation, qui, tout en ayant pu se reproduire aux époques les plus diverses, semblent néanmoins avoir pris une extension particulière dans quelques phases correspondant à des récurrences dans l'histoire orogénique. Nous chercherons bientôt à mettre ces récurrences en évidence.

Les sédiments phosphatés accusent plusieurs types principaux, dont le facies, pour des raisons mal démêlées, mais qui tiennent aux conditions de sédimentation, puis de métasomatose ou de métamorphisme, semble caractéristique de l'âge.

Dans l'archéen, nous aurons des phosphates recristallisés en apatite avec association d'oxydes de fer (A).

Dans les terrains primaires, silurien, dévonien et carbonifère, nous trouverons une disposition très spéciale en nodules sphériques et souvent concrétionnés, avec association de matières organiques rendant ces phosphates noirs ou brun foncé (B).

Dans le jurassique et l'infracrétacé, la disposition la plus ordinaire est celle de rognons ou nodules à forme irrégulière, et à couleur grise ou verdâtre, ayant pu autrefois donner l'idée de coprolithes. Ces nodules sont le plus souvent des concrétions. Mais parfois aussi on constate qu'ils ont été roulés comme des galets et qu'ils s'associent, en effet, avec des galets proprement dits (C).

Dans le crétacé supérieur et l'éocène, les phosphates, tout en gardant aussi l'allure de nodules, prennent plus généralement l'allure de craies phosphatées brunes ou piquetées, à teneur plus faible, mais accusant des extensions parfois énormes (souvent avec nodules à la base) (D).

¹ 1882. CALDERON Y ARANA. *Rocas volcanicas del Cabo de Gata* (Bol. Com. Map. geol. Esp., t. 9, p. 333).

Enfin, les derniers phosphates de la fin du tertiaire et du pléistocène tendent à adopter la disposition concrétionnée des phosphorites, avec répartition en poches irrégulières, ou se disposent en nodules analogues à ceux de l'infra-crétacé (E).

Tous ces phosphates paraissent s'être développés surtout dans trois conditions :

1° Dépôt relativement éloigné du rivage, à moins de 1000 m. de profondeur, là où le régime des courants amenait des accumulations spéciales d'organismes ou de solutions phosphatées empruntées près de là à des organismes (craies phosphatées de Belgique, Tunisie, etc.);

2° Dépôt littoral ou lagunaire à proximité plus immédiate de la côte à l'état de rognons et nodules, parfois avec association de matières charbonneuses et bitumineuses ayant pu être prises aux mêmes organismes qui donnaient en même temps leur phosphore. Dans le primaire, comme nous venons de le dire, ce genre de gisements accuse d'ordinaire une concentration sphérique toute spéciale, avec enduit graphiteux (nodules de Podolie, des Pyrénées);

3° Dépôt continental, assimilable dans quelque mesure aux guanos, soit dans des grottes, soit sur des plateaux émergés dans des zones chaudes, telles que celles actuellement situées dans la zone équatoriale.

Dans tous ces cas, nous attribuons, on l'a vu, en majeure partie, la concentration du phosphate à l'intervention des êtres organisés : ceux-ci ayant eux-mêmes pris leur phosphore, par l'intermédiaire d'eaux dissolvantes douces ou salines, aux terrains et aux roches; c'est-à-dire que nous rattachons l'origine du phosphore, en dernière analyse, à l'apatite cristallisée des roches. Les phénomènes d'endomorphose, où des sédiments phosphoreux auront été assimilés par des fusions ignées, ont pu, dans une phase ultérieure du cycle, contribuer à enrichir en apatite de nouvelles roches cristallisées, aux dépens de sédiments phosphatés antérieurs.

En ce qui concerne les phosphates marins, nous remarquerons que ces gisements correspondent d'ordinaire à des périodes de transgression marine, où un emprunt aux sédiments continentaux et aux roches ou terrains érodés a pu quelquefois intervenir : cela aussi bien à la fin du dévonien dans le Tennessee que dans l'infra-crétacé de l'Europe centrale, dans l'éocène de l'Afrique du Nord, dans le sarmatien du Cotentin, etc.

Nous avons, en outre, signalé la grande part qu'il faut attribuer aux remises en mouvement superficielles, qui ont eu pour effet des concentrations, aux dépens des gites précédents, soit sur les affleurements des dépôts marins, soit sur toute l'étendue des phosphates continentaux, soit encore avant les retours de la mer qui se sont produits sur des surfaces continentales précédemment émergées, avec remaniement de terrains antérieurs et de fossiles ou d'ossements englobés dans ceux-ci¹. Le rôle important de ces altérations dans la constitution actuelle des gisements nous a déterminé à les classer, non d'après leur origine suivant la subdivision précédente, mais uniquement d'après leur âge.

¹ Voir plus haut, p. 649.

Si on laisse de côté quelques exceptions, comme le cas des phosphates noirs pyrénéens, celui de Gafsa en Tunisie, etc., on remarquera, d'autre part, que les terrains phosphatés ont généralement été peu plissés après leur dépôt; là où on observe des dislocations, ce sont plutôt souvent des flexures que des plis proprement dits. C'est l'inverse de ce qu'on remarque pour les couches pétrolifères, où les plissements sont la règle et les strates horizontales l'exception. On peut en chercher la raison dans les conditions mêmes qui ont présidé à ce genre de dépôts, puisqu'ils ont été effectués, comme on vient de le voir, surtout dans des phases de transgression sur des pénéplaines correspondant à des zones antérieurement plissées puis érodées, avant une nouvelle grande phase de plissements et en dehors du champ d'action de ce nouveau plissement.

Déposées sur une plateforme stable par un retour des eaux en lame relativement peu profonde, les couches phosphatées riches ont, d'ordinaire, une faible épaisseur. Beaucoup d'entre elles se bornent à un simple cordon de nodules de quelques centimètres à un mètre. Les craies phosphatées elles-mêmes ont une épaisseur restreinte qui, dans les cas les plus remarquables, ne dépasse guère une dizaine de mètres. On n'aperçoit donc pas ici ces approfondissements progressifs d'un synclinal ou d'une plateforme submergée, qui sont si marqués dans d'autres catégories de gisements, comme le sel ou la houille. Ces observations s'appliquent, par exemple, aux phosphates dévoniens du Tennessee et de l'Arkansas : couches horizontales antérieures aux mouvements hercyniens, dans une zone latérale par rapport à ces plissements futurs. Elles sont vraies pour la plupart des couches à nodules infracrétacées, pour les craies phosphatées sénoniennes du Nord de la France et de la Belgique, comme pour les phosphates éocènes d'Algérie. Les uns et les autres, antérieurs aux grands mouvements oligocènes, ont été peu influencés par eux. Et les phosphates plus récents de la Caroline, de la Floride ou du Pacifique présentent encore plus ce caractère de superpositions à un socle horizontal. Dans bien des cas, on croit voir intervenir, pour les craies phosphatées anciennes, le caractère de zones à atolls coralliens qui est si caractéristique aujourd'hui pour la Floride et surtout pour le Pacifique.

A. — PHOSPHATES ARCHÉENS (SCANDINAVIE) ¹

Nous avons déjà rappelé que l'on trouve, dans les terrains cristallophylliens de Scandinavie, de nombreuses intercalations de minerais de fer. Quelques-uns de ceux-ci contiennent une telle proportion d'apatite cristallisée que l'on a pu en opérer la préparation mécanique industrielle. L'état actuel du marché des phosphates empêche cette opération d'être bien fructueuse; ces minerais de fer n'en constituent pas moins de véritables minerais de phosphore, qui se trouvent d'ailleurs indirectement utilisés par leurs scories de déphosphoration. Nous considérons cet

¹ L. DE LAUNAY. *Les minerais de fer scandinaves*, loc. cit., p. 154 et bibl. citée. — Voir t. 2.

ensemble comme probablement assimilable aux autres minerais de fer phosphoreux intercalés dans le reste de la série sédimentaire (les minerais de Meurthe-et-Moselle, par exemple), et nous voyons donc, dans ces couches ou lentilles si particulières d'hématite, magnétite et apatite, un cas ancien d'accumulations phosphatées et ferrugineuses analogues à celles qui se sont reproduites ensuite dans toute l'histoire des temps, mais ayant subi ici une recristallisation. Ces minerais, dont il a déjà été question plus haut¹, se présentent à nous : soit à Gellivara, comme des cristallisations grenues d'apatite claire et d'oxydes de fer noirs, analogues d'aspect à des diorites, dont l'élément blanc serait l'apatite et l'élément noir la magnétite ; soit encore, dans le cas discutable de Kirunavara, comme des magnétites compactes, dans lesquelles l'apatite, très abondante, est si finement disséminée qu'on la voit seulement au microscope. Les teneurs sont généralement plus fortes que dans les minerais de fer non métamorphiques plus récents d'autres régions. Sans parler des points où l'apatite pure s'est concentrée, ni des filons de pegmatite à apatite précédemment décrits, on obtient pratiquement, à Gellivara, des minerais à plus de 0,1 de phosphore ; d'autres tiennent entre 0,05 et 0,1, etc.

H. Lundbohm estime, par exemple, qu'à Gellivara l'ensemble des gisements, en ne considérant que les principaux, peut couvrir environ 437 600 m², dont 2/10 tiennent des minerais entre 0,011 et 0,196 p. 100 de phosphore : 1/10 entre 0,152 et 0,85 (en moyenne 0,382 à 0,405), et les autres 7/10, de 0,185 à 4,050 (1 à 22 p. 100 d'apatite).

Dans le Dunderland, la teneur moyenne en phosphore est de 0,2 p. 100.

A Kirunavara, les teneurs montent souvent à 2 et 3 p. 100 de phosphore. La teneur de 0,1 à 0,8 est très répandue et l'amas total à 1,58 p. 100 de teneur moyenne peut tenir plus de 2 000 000 t. de phosphore.

Dans tous ces cas de minerais scandinaves, il y a lieu de se demander jusqu'à quel point le métamorphisme aurait pu contribuer à cette teneur en phosphore. Il semble cependant, après discussion, que, pour les véritables lentilles sédimentaires du type Gellivara, l'introduction ultérieure de phosphore par les venues granulitiques ait été insignifiante. Le cas de Kirunavara est plus délicat : tout cet amas devant probablement, comme nous le verrons, être assimilé à une ségrégation de roches acides sodiques, qui nous ramènerait aux associations d'apatite avec la granulite étudiées dans un paragraphe précédent.

B. — PHOSPHATES NOIRS SILURIENS ET DÉVONIENS

Silurien du North Wales (3)². — Le silurien comprend, dans le North Wales anglais, un dépôt de phosphates intéressant quoique inexploité,

¹ Page 656. Voir leur étude complète au t. 2, p. 421 à 441.

² 1867. DAVIES. *On a bed of phosphate of lime in North Wales* (Geol. Magaz., t. 4, p. 257). — 1875. DAVIES. *The phosphorite deposits of North Wales* (Q. J. geol. Soc. Lond., t. 31, p. 357). — 1888. PENROSE. *Phosphate of lime*, p. 80.

où ces phosphates présentent une disposition en nodules à ciment graptueux que nous allons retrouver dans d'autres gisements de phosphates primaires, en Podolie russe, dans les Pyrénées françaises, etc.

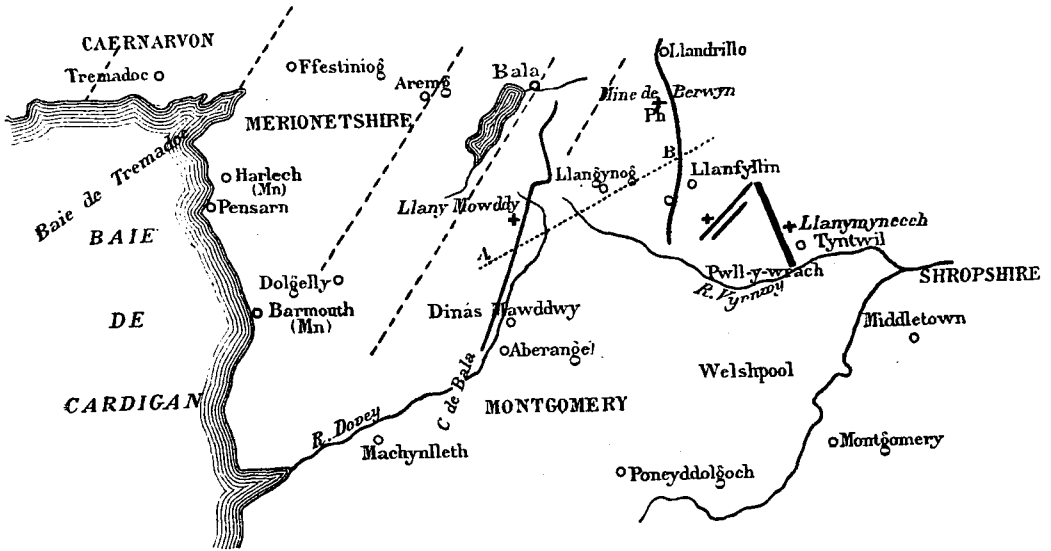


Fig. 98. — Carte montrant la position des niveaux phosphatés dans le calcaire de Bala (North Wales.)

Les traits pleins indiquent les affleurements du calcaire du Bala, les + les gisements reconnus de phosphates (Ph). — Mn, les mines de manganèse.

Les couches dessinent là des zones plissées de direction N.-N.-E., ainsi que le montrent les figures 98 et 99. De A en B, on trouve un synclinal ; de B en C, un anticlinal.

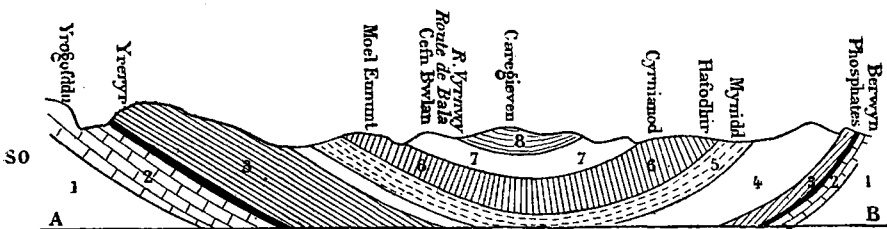


Fig. 99. — Coupe verticale AB de la région phosphatée du North Wales.

6, 7, 8, schistes de Wenlock (gothlandien moyen). — 5, schistes de Tarennon. — 4, schistes gris et bleutés. — 3, schistes gréseux et calcarifères. — Phosphates. — 2, calcaire de Bala (ordovicien supérieur). — 1, lits bleus ardoisiers à fossiles.

Le niveau de phosphates, reconnu surtout autour de Berwyn, suit la partie supérieure du calcaire de Bala, à la limite de l'ordovicien (3) et du gothlandien (4), sous l'assise de Llandovery ¹.

¹ Il existe, un peu plus haut dans la série géologique anglaise, une couche à ossements, ou bone bed, dans les schistes de Ludlow (Gothlandien supérieur) (4).

Si l'on prend la coupe des couches au voisinage, telle qu'on peut l'observer dans la mine de Bala, on a la succession suivante de haut en bas :

- a. Schistes gris avec échinodermes et autres fossiles phosphatisés (1);
- b. Lit de phosphates;
- c. Calcaire sombre imprégné de phosphates (2);
- d. Schistes sombres avec veines de sulfate de baryum (1);
- e. Calcaire avec veines de sulfate de baryum;
- f. Schistes sombres;
- g. Calcaires gris bleutés, etc.

Le lit de phosphate a une épaisseur variable de 0,50 m. à 1 mètre. Il est généralement noirci par une forte proportion de graphite; là où il ne contient pas de graphite, il est accidentellement d'un jaune pâle. Le banc est formé de nodules agglomérés les uns aux autres, souvent d'un aspect poli dû à la présence du graphite et cimentés par une matière noire. On y trouve beaucoup de pyrites. La teneur en phosphate dépasse 60 p. 100.

Silurien de Podolie¹. — Comme rapprochement avec le North Wales, nous ne mentionnerons que pour mémoire les concrétions phosphatées noduleuses intercalées dans les schistes ardoisiers d'Angers²; mais il y a quelques mots à dire sur les schistes à phosphates du même âge, qui affleurent sur les bords du Dniester (Podolie russe), et qui constituent, jusqu'ici, le seul gisement phosphaté un peu exploité en Russie.

Les phosphates de la *Podolie* sont intéressants par leur forme de boules parfois rigoureusement sphériques et leur enveloppe charbonneuse : caractères qui les rapprochent à la fois des gisements précédents du pays de Galles et de ceux, étudiés plus loin, dans les Pyrénées.

Ils marquent un phénomène littoral de l'époque gothlandienne (4). Dans les schistes de cet étage, souvent recouverts par des schistes marneux et calcaires de l'époque crétacée, on trouve le phosphate sous la forme de concrétions sphériques à structure fibreuse et radiée, tenant un noyau interne de calcite, et ayant une teneur moyenne de 70 p. 100 de phosphate de chaux, qui varie de la circonférence au centre dans les échantillons. Ces nodules sont un peu exploités pour être exportés en Allemagne.

Phosphates dévoniens du Tennessee (10)³ — Le golfe appalachien, dont la partie Nord contient les terrains pétrolifères étudiés dans un chapitre précédent⁴, renferme, dans sa partie méridionale, un lit de schiste noir charbonneux, dit Black Shale, qui termine le néodévoniien, passant à

¹ Coll. Ecole des Mines, 1647 (Barbouki) et 1658 (Jourjewka). — 1884. O'REILLY. *Notes on the Phosphorite nodules of Podolia* (Sc. Proc. of R. Dublin Soc., t. 4, p. 215; cf. 1902. Z. f. pr. G., p. 351).

² Voir encore : 1901. KLUFZ. *Die Phosphoritführung des Vogtländischen Obersilur...* (N. J. f. Min., t. 15, 65 p; C. R. Z. f. pr. G., 1902, p. 301).

³ Coll. Ec. d. M., 2185. — THOMAS MEADOWS et LYTLE BROWN. *The Phosphates of Tennessee* (Tr. A. I. M. E., t. 24, p. 584). — 1894. SAFFORD. *Phosphates du Tennessee* (Z. f. pr. G., p. 201). — 1900. HAYES. *Tennessee white phosphate* (21. Ann. Rep. of the U. S. geol. Surv., p. 473-485).

⁴ Tome 1, page 508.

l'ocasion en discordance sur les calcaires de l'ordovicien (3) ou du gothlandien (4), et accusant ainsi une transgression dévonienne vers le Sud-Est. Dans le centre du Tennessee, ce lit schisteux, qui atteint souvent ailleurs 70 m., se réduit d'épaisseur et il s'y intercale une formation phosphatée, dont l'importance industrielle est considérable et le serait encore plus si ces phosphates n'avaient pas à supporter 600 km. de transport jusqu'à la mer. Cette série schisteuse phosphatée représente le passage du dévonien au carbonifère, avec des conditions de transgression que nous retrouverons fréquemment pour les phosphates marins.

A la base, on a du phosphate en roche noir ou brun foncé, qui présente souvent un facies oolithique, ailleurs une structure granuleuse ou compacte, avec phosphatisation de fossiles dévoniens antérieurs à la régression. C'est ce phosphate en roche que l'on exploite seul. Il est presque totalement dépourvu de carbonate de chaux et contient 27 à 30 p. 100 d'acide phosphorique, avec mélange intime de matières organiques qui le noircissent. Au-dessus vient une couche à nodules, dont l'épaisseur ne dépasse pas 30 cm. Les nodules sont sphériques ou légèrement aplatis suivant le plan de schistosité. Leur pâte est noire ou brun foncé avec une structure finement granulaire; leur décomposition s'opère par noyaux concentriques; mais on n'y trouve pas, en général, les restes fossiles ou les noyaux de concrétion que nous rencontrerons dans d'autres nodules semblables. La pyrite accompagne fréquemment le phosphate. La présence de plantes, comme le facies oolithique, impliquent la proximité du rivage.

Ces terrains, qui se sont déposés dans la période préliminaire des mouvements hercyniens par extension latérale sur la plate-forme archéenne, ont été très peu plissés.

Phosphates dévoniens de l'Arkansas¹. — Un niveau géologique, analogue à celui du Tennessee, mais de faible importance industrielle, se retrouve dans l'Arkansas, où il occupe une vaste zone entre Buffalo City au Nord et Marshall au Sud. On a là, sur des calcaires marbres du silurien inférieur, un très mince niveau représentant le dévonien supérieur transgressif, qui commence, à la base, par du phosphate en roche et se continue par un grès à nodules noirs, dit de Sylvamore, au-dessus duquel vient le dinantien concordant. Ces phosphates noirs représentent donc, ici comme dans le Tennessee, une transgression littorale, un peu plus ancienne dans le cas présent et destinée à s'accroître pendant la première partie du carbonifère. Ces terrains sont restés tout à fait horizontaux et ont échappé aux plissements hercyniens, accusés plus à l'Est.

Phosphates noirs dévoniens des Pyrénées (10)². — En 1899, l'attention a été attirée sur un niveau de phosphates intercalé avec une grande extension dans le dévonien supérieur des Pyrénées. Ce gisement a com-

¹ 1896. JOHN B. BRANNER. *The Phosphate deposits of Arkansas* (Trans. of the Am. Inst. of M. E., t. 26. p. 580).

² Coll. Ecole des Mines, n° 2202 (vallée d'Aspe, las Cabesses, Rimont, la Bastide de Cerou, Celles, Saint-Antoine, Durban, Prades, Caunes). — 1899. LEVAT. *Phosphates noirs des Pyrénées* (Ann. des Min., janv., 100 p. et 2 pl.; cf. Assoc. franc. Congrès de Nantes, 1898. *Phosphates noirs d'Accous, Hautes-Pyrénées*. C. R., 21 nov. 1898).

plètement déçu les espérances enthousiastes qu'il avait fait naître d'abord, et son exploitation se borne à quelques petits travaux sur l'ancienne mine de manganèse de Las Cabesses dans l'Ariège (fig. 100)¹; mais il n'en conserve pas moins son intérêt théorique comme marquant l'existence, dans le dévonien français, de gisements analogues à ceux que nous venons de décrire dans le silurien du Pays de Galles et de la Podolie, dans le dévonien du Tennessee et de l'Arkansas et qui, pour une raison mal définie, semblent constituer le facies primaire des concentrations phosphatées.

Les phosphates des Pyrénées ont été signalés par D. Levat : à l'Est d'Oloron à Accous, Lescun et Rac Manaudas; puis, sur 20 km. de long, entre St-Girons et Foix; enfin dans le massif des Corbières et le flanc Sud de la Montagne Noire, près de Caunes. Ils forment un niveau assez constant

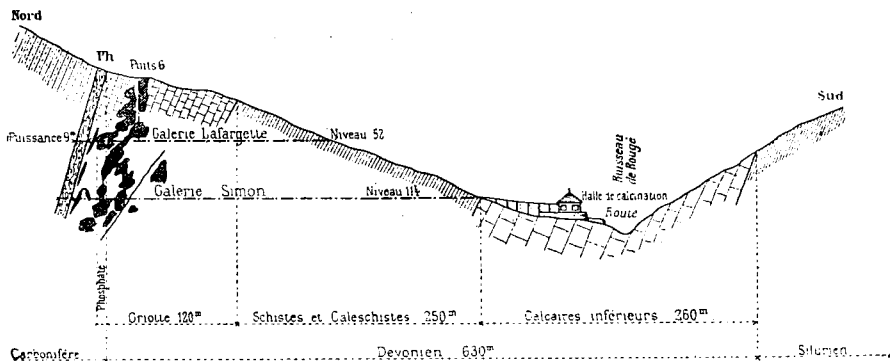


Fig. 100. — Gisements de phosphates noirs de Las Cabesses. Coupe NS par l'axe du puits 6. — Ph : couche à phosphates.

au-dessus des calcaires griottes du dévonien supérieur, sous les schistes carbonifères : par exemple, entre les deux formations, dans la mine de Las Cabesses. Leur niveau s'intercale ainsi entre deux formations pélagiques qui, dans ce cas, ont paru concordantes.

Leur aspect général est celui d'une roche noire, d'aspect souvent schisteux ou feuilleté, brillante, tachant fortement les doigts en noir et se délitant fréquemment suivant des surfaces courbes, qui semblent un premier indice de la tendance à former des nodules. Ces roches noires sont telles qu'on a pu les prendre pour de mauvais anthracites. Parfois on y trouve des zones siliceuses (lydite ou phtanite), formées par des accumulations de radiolaires, autour desquels le phosphate s'est concentré comme dans les craies phosphatées; mais la forme riche est celle de nodules qui s'isolent localement.

Ceux-ci semblent avoir été, au début, sphériques comme ceux de Podolie. Par suite de l'écrasement des terrains, on les trouve, en général, disposés comme des ellipsoïdes, ou des amandes aplaties, enveloppées par des couches schisteuses. Certains d'entre eux atteignent un

¹ Voir la description de ce gisement, au tome 2, p. 544 à 549, avec carte.

poids de 40 kg. Ils sont formés d'une pâte grise assez homogène, où l'on distingue fréquemment des zones concentriques ayant pour centre, soit un cristal de pyrite, soit un débris de fossile, soit un grain de substance quelconque.

Tout cet ensemble est phosphaté sur une épaisseur qui atteint parfois plusieurs mètres, mais avec des teneurs en phosphate très irrégulières et d'ordinaire trop faibles pour valoir une exploitation. La couleur noire et salissante de cet engrais nuit également à son commerce. Quand on analyse des nodules triés, on y trouve souvent une composition très voisine de celle de l'apatite, avec 60 à 65 p. 100 de phosphate tribasique : soit 28 à 30 d'acide phosphorique. Les schistes noirs à nodules peuvent également atteindre 20 p. 100 d'acide phosphorique. Si l'on fait abstraction des nodules, la teneur tombe au-dessous de 16 dans les schistes contournés les plus favorables et à 6 p. 100 dans le reste des schistes. La teneur en fluor des nodules est d'environ 2,70 p. 100. Il faut également mentionner, dans ces phosphates, l'abondance des matières organiques avec quelques millièmes d'azote organique.

Nassau. — Nous décrivons plus loin¹, comme gîtes de concentration tertiaires, les phosphates du Nassau. On doit cependant remarquer qu'il paraît y avoir là, à la base du famennien, un niveau phosphaté de schistes à nodules intercalé entre deux étages calcaires, dans des conditions stratigraphiques analogues à celles que nous venons de rencontrer. Ces schistes, d'après E. Fuchs, contiennent 3 à 5 p. 100 de phosphates et sont inutilisables. Leurs nodules sont presque exclusivement calcaires. Néanmoins, comme on trouve, dans la même région, des concentrations superficielles de phosphates tertiaires, on peut se demander dans quelle mesure ce phosphate dévonien aurait contribué à la concentration superficielle récente.

Minerais de fer phosphoreux du silurien et du dévonien. — L'étage silurien contient un grand nombre de minerais de fer phosphoreux, qui, par l'emploi des scories phosphatées, se trouvent intervenir accessoirement dans l'industrie des phosphates. Il suffit de citer nos minerais normands, ceux de Bohême, etc. Les minerais phosphoreux devoniens des Asturies, qui sont considérés comme une immense ressource en fer pour l'avenir, doivent être également signalés à cette place².

Phosphates carbonifères. — Le type des phosphates primaires associés à des matières charbonneuses s'est poursuivi parfois dans les lacs et lagunes de l'époque carbonifère, sans y prendre jamais grand développement. On rencontre, dans cet étage, des nodules ou rognons terreux, généralement substitués à la sphérosidérite, comme dans les argiles et les schistes argileux de Fins (Allier), où leur teneur atteint 57 p. 100 environ de phosphate ; ailleurs, on a des imprégnations phosphatées dans les calcaires bitumineux qui en renferment de 3 à 7 p. 100.

De semblables nodules se retrouvent dans les argiles schisteuses noires du bassin de la Ruhr.

¹ Tome 1, p. 712 et 713.

² Voir tome 2, p. 293 à 304, la répartition du phosphore dans les minerais de fer.

C. — NODULES PHOSPHATÉS SECONDAIRES

1° NODULES PERMO-TRIASIQUES (14 à 19)

Var, etc. — Avec le permo-trias on commence à rencontrer, en France, quelques rognons phosphatés en relation avec les transgressions, consécutives des plissements hercyniens, qui se sont poursuivies du permien à l'infra-jurassique, ramenant peu à peu la mer dans l'Europe occidentale.

On a signalé des nodules dans les argiles rougeâtres et dans les grès bigarrés des environs de *Poujet* et de *Fréjus* (Var), qui sont les représentants du permien supérieur et du werfénien (17), ainsi que dans les marnes gypseuses de *Draguignan*, qui sont rapportées au virglorien (18).

2° NODULES JURASSIQUES (20 à 31)

Bone-Beds rhétiens (20)¹. — L'époque rhétienne est marquée de tous côtés, en Bavière, en Lorraine, en Angleterre, en Franche-Comté, etc., par des lits à ossements, qui sont une première forme des dépôts phosphatés, destinés à s'accuser un peu plus tard. On voit, par exemple, en Angleterre, à ce moment, des fissures du sol se remplir d'une extraordinaire quantité de dents de reptiles.

Phosphates de l'Auxois (sinémurien, 22). — L'époque hettangienne et sinémurienne marque, dans l'Europe occidentale, une accentuation des précipitations littorales, où se forment, tantôt des minerais de fer (hettangien de Bourgogne, etc.), tantôt des phosphates (sinémurien). Parmi ces derniers, qui ont eu autrefois une importance industrielle, tout à fait disparue aujourd'hui, nous allons avoir à citer les gisements de l'Auxois, près de Semur, de la Haute-Marne, de Meurthe-et-Moselle, des Ardennes, de la Haute-Saône, du Cher, de l'Indre, etc., ainsi que les accumulations de coprolithes de Lyme Régis sur la côte anglaise². Ces caractères se poursuivent ensuite, ou s'atténuent pendant tout l'infra-jurassique.

Dans l'*Auxois*, au Nord et à l'Est du promontoire granitique que forme le Morvan, s'étend une bande de calcaires à gryphées (sinémurien) et de marnes. Les phosphates s'y trouvent à deux niveaux (zone à Ariétites stellaris et zone à Ammonites Bucklandi).

Lorsque ces calcaires sont décomposés par les agents atmosphériques, ils donnent naissance à un limon rouge ferrugineux, dans lequel sont empâtés les nodules de phosphates qui ont échappé à la décomposition³.

L'existence de ces nodules phosphatés fut reconnue, pour la première fois, en 1822, par de Bonnard, dans une tranchée du canal de Bourgogne à Saint-Thibault. En 1876, une exploitation commença aux environs de Semur.

¹ Voir L. DE LAUNAY. *La Science géologique*, p. 513 et suiv.

² E. RECLUS, t. 4, 453.

³ Gisement visité en 1889. — Coll. Ecole des Mines, 1856 (Montigny-sur-Armançon). — Voir : 1825. DE BONNARD. *Notice géognostique sur quelques parties de la Bourgogne*. — 1872. COLLENOT. *Du phosphate de chaux dans l'Auxois* (B. S. G. F., 3^e, t. 5, p. 671). — 1879. *Réunion de Semur* (B. S. G. F., 3^e, t. 7, p. 910). — 1886. *Statistique de l'industrie minière*.

La zone phosphatée existe, entre Semur et Avallon, sur une étendue d'environ 5 000 hectares, pouvant fournir par hectare 3 000 t., soit en tout 1 500 000 t. Elle a été surtout exploitée entre Semur et Beaune, à Montigny-sur-Armançon, etc. La teneur des nodules, généralement tufacés et concrétionnés, varie de 55 à 65 p. 100. Dès l'hettangien (21), des nodules semblables sont associés à des oolithes ferrugineuses (Thostes), auxquelles ils passent souvent par transition insensible¹. Le rendement moyen est de 30 à 40 kg. par mètre carré et la couche présente une épaisseur variable de 10 à 60 cm.

L'analyse de ces phosphates donne de 15 à 17 p. 100 d'acide phosphorique et 4,50 à 5 p. 100 de fluorure de calcium.

L'extraction avait lieu à ciel ouvert au moyen de tranchées, où l'on mettait à nu le lit de nodules de 10 à 12 cm., qui repose, soit sur du limon, soit sur des bancs calcaires.

Haute-Saône (sinémurien, 22). — En dehors de l'Auxois, des imprégnations phosphatées ont été signalées en bien d'autres points dans le calcaire à Gryphées sinémurien : à Chalindrey (Haute-Marne); à Neufchâteau et à Tomblaine (Meurthe-et-Moselle); dans plusieurs localités des Ardennes; à Saudoncourt (Vosges), etc. Pendant un certain temps, de 1882 à 1883, on en a exploité de semblables au Sud-Est du département de l'Yonne, sur le prolongement des couches d'Avallon.

Dans le Cher, le sinémurien contient, à Germigny (près de la Guerche) un gisement équivalent à celui de l'Auxois. Ce même niveau a été un peu exploité dans l'Indre, aux environs d'Argenton.

Nous nous contenterons de décrire rapidement les *carrières de la Haute-Saône* qui, vers 1880, ont eu quelque importance aux environs de Pomoy et de Vitrey d'abord, ensuite près d'Auxon (8 000 t. en 1884).

Le gisement, identique à celui de l'Auxois, est formé d'une couche d'argile, avec lits et poches de nodules blanchâtres de phosphate de chaux, située immédiatement au-dessous du calcaire à Gryphées et suivant constamment la limite de séparation de l'hettangien.

L'épaisseur du lit principal (surmonté à une distance de 30 cm. par un lit mince nommé *cordons*), varie de 5 à 20 cm. Accidentellement, on y trouve des poches de remaniement qui atteignent 0,80 m., mais avec un mélange de cailloux quartzeux diminuant le rendement.

La teneur moyenne en nodules est de 35 à 60 p. 100; ces nodules eux-mêmes renferment de 27 à 30 p. 100 d'acide phosphorique.

Les nodules sont, en moyenne, de la grosseur d'une noix, parfois plus volumineux; leur couleur est le blanc jaunâtre ou un peu plus foncé, leur dureté est assez grande. On rencontre, mélangés avec eux, un très grand nombre de moules de fossiles phosphatés, contenant eux-mêmes 65 p. 100 de phosphate.

¹ Voir t. 2, p. 482.

² 1879-80. JEANNOU. *Note sur la présence des phosphates dans le Lias des Ardennes et de la Meuse* (Ann. Soc. géol. du Nord, t. 8). — 1879-80. NIVORT. *De l'acide phosphorique dans les terrains de transition et dans le Lias des Ardennes* (B. S. G. F., 3^e série, t. 8, p. 357). — 1893. BLEICHER. *Nodules phosphatés du Lias de Lorraine* (B. S. G. F., 3^e, t. 20, p. 237).

Cher et Indre (charmouthien, 23 et toarcien, 24). — Au-dessus du niveau de l'Auxois, le charmouthien (23) et le toarcien (24), renferment, dans les départements du Cher et de l'Indre, plusieurs niveaux phosphatés, qui ont été étudiés en détail par A. de Grossouvre. : l'un, à la base, dans une petite couche à *Amm. communis* (Neuvy-Saint-Sépulcre, Indre); l'autre plus haut dans les couches à *Amm. radians* (Saint-Maixent et Thouars); le dernier tout à fait au sommet de la formation dans les couches à *Amm. opalinus*. Aucun de ces niveaux n'a été utilisé.

Des phosphates ont été également signalés dans cet étage dans la Corrèze, près de Digne, en Souabe, etc.

Toarcien de Lorraine (24), Scories phosphatées. — Le toarcien, sous forme d'oolithe ferrugineuse, fournit, dans la Lorraine, l'Alsace-Lorraine et le Luxembourg, un appoint sérieux, mais indirect, au commerce des phosphates. Cette oolithe, dite minette, constitue, on le sait, l'un des plus grands bassins ferrifères actuellement connus dans le monde. Or les minerais de cet étage, à caractère sublittoral, renferment jusqu'à 1 p. 100 d'acide phosphorique, que le procédé de déphosphoration au convertisseur basique permet d'isoler dans des scories ferro-magnésiennes.

Ces scories, qui renfermaient en principe 10 à 11 p. 100 d'acide phosphorique¹, mais que les usines pouvaient livrer à très bon compte, ont commencé à être essayées comme engrais, non sans quelque défiance, vers 1885. En 1886, sur 50 000 t. de scories produites en France, on n'en vendait que 13 000. Mais, cette même année, l'Angleterre et l'Allemagne en consommaient déjà 100 000 t. On craignait que l'acide phosphorique contenu ne fut pas suffisamment assimilable, que la forte proportion de fer ne fût nuisible, etc. Depuis, l'expérience a montré l'excellent effet de ces scories finement moulues sur les sols sablonneux, glaiseux et tourbeux, où, avec le phosphore, elles apportent de la chaux. En même temps, les usines, qui en trouvaient le placement, sont arrivées à fabriquer couramment des scories à 17 p. 100 d'acide phosphorique, correspondant à un lit de fusion d'environ 0,65 à 0,75 p. 100 de phosphore. On pourrait même aisément pousser à 22 ou 25 p. 100 s'il n'y avait pas avantage à ce que la matière fertilisante soit répartie dans une masse suffisante pour rendre facile un épandage régulier. Les scories, dont nous avons donné plus haut les chiffres de production², sont aujourd'hui considérées comme équivalentes aux superphosphates.

Jurassique moyen et supérieur (25 à 31). — La seconde partie du jurassique, ayant été marquée, dans l'Europe occidentale, par le développement de facies marins plus profonds, est, suivant une remarque précédente, de moins en moins riche en phosphates à mesure qu'on envisage des niveaux plus élevés et aucun des gisements signalés dans cet étage n'a pu être utilisé.

¹ Leur composition répond à un tétraphosphate de calcium (1887, Dr OTTO. *Chem. Z.*, n° 18). — 1888. A. PETERMANN. *Essais sur l'assim. de l'ac. phosph. des scories de déphos.* (Mém. Ac. Belg., t. 43).

² Page 638.

Nous citerons néanmoins, dans le Calvados et l'Anjou, l'oolithe bajo-cienne (25). Dans le même étage, A. de Grossouvre a signalé également des phosphates aux niveaux de l'Ammonites Niortensis (Saint-Maixent, Niort), de l'Ammonites Zigzag (Niort et Crussol (Ardèche), et dans les couches du callovien supérieur à Ammonites Duncani (Cher, Nièvre) (27). Le callovien contient de même des phosphates en Franconie. Enfin, l'on trouve, dans l'oxfordien (28), un niveau de phosphates indiqué successivement dans le Cher¹, et dans la Nièvre².

3° NODULES INFRA-CRÉTACÉS (32 à 35)

Le phosphate s'est déposé abondamment en Europe pendant les diverses phases du crétacé, en rapport avec les grands déplacements des mers sans plissements orogéniques accentués, qui ont marqué cette période. Il y affecte, suivant les niveaux, deux types différents : sables à nodules et craies phosphatées, qui correspondent à des conditions de dépôt plus ou moins distantes de la côte, en mer plus ou moins profonde, sans que l'un ou l'autre facies doive être considéré comme caractéristique d'un étage, sinon pour une région restreinte comme l'Europe occidentale.

Néocomien (32). — On a signalé du phosphate dans les marnes du néocomien inférieur de Monte-Reale (Portugal) et du comté de Sussex (Angleterre). Il existe également des nodules de phosphate de fer hydraté renfermant 16 p. 100 d'acide phosphorique, trouvés dans les sables à lignites du néocomien de Fouchères (Aube).

Aptien et Albien (34-35). Généralités. — Cette période infra-crétacée est marquée, dans tout le Nord de la France (Boulonnais, etc.), et le Sud de l'Angleterre, par une incursion de la mer, revenant occuper la place des lagunes du purbeckien et du wealdien, ou s'étendant transgressivement sur le continent. Dans beaucoup de points, il se produit alors des alternances de sédiments détritiques sableux (les « sables verts »), et d'argiles plus fines (Gault), et, dans l'un comme dans l'autre de ces terrains transgressifs, on trouve fréquemment, le long des rivages, des dépôts phosphatés sous la forme de nodules, parfois avec fossiles remaniés.

On commence, au milieu des grès verts aptiens (34), par les nodules phosphatés de Sandy, dans le Bedfordshire. Puis viennent les argiles à phosphates de Boulogne et de Folkestone entre l'aptien et l'albien, les nodules des sables verts albiens (35) dans la Meuse et les Ardennes, ceux des argiles du même âge dans l'Argonne (Talmats). L'albien (35) est également phosphaté à Ceton (Orne); puis, du côté du Jura, à la perte du Rhône, dans le Nord du Dauphiné, dans la Drôme (Saint-Paul-Trois-Châteaux), dans l'Ardèche, sur les bords de la Volga, etc. Parmi ces gisements, quelques-uns, malgré leur inexploitabilité actuelle, méritent une courte description.

¹ 1858. GUÉRANGER (Bull. de la Soc. des sciences de l'Yonne). — DOUVILLÉ. (B. S. G. F., 3^e série, t. 2, p. 103. — 1885. DE GROSSOUVRE. *Etude sur les gisements de phosphate de chaux du centre de la France* (Ann. des Min., mai, juin 1885, et B. S. G. F.).

² DE GROSSOUVRE (B. S. G. F., 2^e, t. 15, p. 707, 1878). — *Statistique de 1886*, p. 274.

Phosphates infra-crétacés d'Angleterre¹. — L'Angleterre, où l'industrie des phosphates a débuté vers 1822, mais est aujourd'hui terminée, présente une bonne coupe des niveaux phosphatés infra-crétacés.

Dans la région des Alpes, on sait que ces dépôts infra-crétacés, succédant sans interruption aux assises oolithiques, offrent, comme ces dernières, un caractère exclusivement marin. De ce côté, il n'y a pas trace de phosphates. Au contraire, dans le Sud de l'Angleterre, où se présentent les phosphates, l'émersion d'un continent s'annonce par les couches saumâtres et d'eau douce du Purbeck et s'accuse, pendant le crétacé inférieur, par des facies absolument terrestres. C'est un fait surtout caractérisé dans la région dite le Weald, sur les territoires de Kent et de Sussex : d'où le nom de formation wealdienne donné au néocomien anglais (32).

Au-dessus de ces couches exclusivement d'eau douce, viennent des terrains de sables et argiles verts, connus sous le nom d'ensemble de grès vert (greensand) et se subdivisant en lower greensand (grès vert inférieur) ou aptien (34), gault (albien, 35) et grès vert supérieur (upper greensand) représentant la base du cénomanién (36).

Le grès vert inférieur est considéré comme une formation marine littorale déposée en des eaux agitées ; le gault (argile de Folkestone) est représenté, comme dans le Boulonnais, par une argile noire ou bleue très tenace et remarquablement fossilifère ; enfin le grès vert supérieur est un sable micacé et glauconieux, argileux à la base.

Chacun de ces trois étages, aptien, albien et cénomanién, renferme, dans les comtés de Bedford et de Cambridge, un banc de nodules phosphatés.

La coupe générale est la suivante :

Eocène inf. (41)	{ Niveau du phosphate de Suffolk	
	{ Argile de Londres (Landénien).	
Sénonien (38) . .	{ Craie phosphatée de Taplow	
	{ Craie de Douvres et de Margate	
Turonien (37) . .	Calcaire blanc	500 mètres.
Cénomanién (37)	{ Marne	30 —
	{ Uppergreensand (grès vert supérieur)	
	<i>Phosphates d'Ely.</i>	
Albien (35) . .	Gault argileux (ou sables verts)	60 mètres.
	<i>Phosphates de Boulogne et Folkestone.</i>	
Aptien (34) . .	Lowergreensand (grès vert inférieur).	500 mètres.
	<i>Phosphates de Sandy.</i>	
Néocomien (32).	Argiles du Weald	
Jurassique (31).	Oolithe	

¹ 1875. BRODIE. *On a dep. of phosph. nodules on the Lower greensand of Sandy* (Bedfordshire). — 1875. HARRIS TEALL. *The Potton and Wicken Phosphate dep.* (Cambridge. Deighton, Bell and Co). — 1886. HARRY SEELEY. *Rock of the Cambridge greensand* (Geol. Magaz., p. 302). — REV. DE FISHER. *On the phosph. nodules of Cambridgehire* (Q. J. g. soc. Lond., t. 29, p. 52). — 1888. DAVIES, p. 146. — 1888. PENROSE (*Phosphate of lime*, p. 84).

Le gisement le plus important est peut-être celui des environs de *Sandy*, dans le Bedfordshire.

Les bancs de phosphates, compris entre deux couches de sable à la base du *lowergreensand*, ont 0,50 m. à 0,60 m. d'épaisseur. Les nodules sont incrustés par un sable ferrugineux assez dur; ils sont de toutes formes, généralement de section brune ou noire, contiennent fréquemment des fossiles et sont assez irrégulièrement répartis. On a remarqué qu'à peu près la moitié de ces fossiles venaient des terrains inférieurs, auxquels ils ont été arrachés par la transgression marine: en particulier, des ammonites du portlandien, des os d'iguanodon et de *megalosaurus* du Weald et du Purbeck, des restes de poissons du Kiméridgien.

Ce sont des conditions, dont nous avons déjà signalé¹ la répétition fréquente pour maint gisement phosphaté situé dans les mêmes conditions stratigraphiques, et qui sembleraient indiquer la remise en mouvement par les eaux marines de matières organiques phosphatées, préalablement accumulées sur un continent.

Dans le Nord du *Cambridge* (c'est-à-dire au N.-E. du gisement précédent), près d'*Ely*, le niveau de phosphates exploité est, au contraire, à la partie supérieure de l'albien. Ce sont aussi des nodules irréguliers, de surface parfois verte, de cassure toujours brune et contenant également des fossiles ou des os enlevés aux terrains précédents.

Enfin, pour n'avoir pas à revenir sur l'Angleterre, nous citerons de suite, au-dessus de l'argile de Londres (*London clay*), c'est-à-dire dans l'éocène inférieur, les phosphates de *Suffolk*, moins estimés dans le commerce que ceux de *Sandy* à cause de leur teneur plus forte en oxyde de fer et de leur dureté plus grande.

Boulonnais² (albien, 35). — Les phosphates du Boulonnais ont d'abord été exploités, il y a une trentaine d'années, auprès de Marquise. De 1877 à 1883, la production annuelle s'est maintenue à 20 000 t.; mais, vers cette époque, la découverte des phosphates riches de Mesvin-Ciply (Belgique) a commencé à faire diminuer la production, qui est tombée à presque rien.

Le bas Boulonnais forme une région nettement caractérisée par son socle jurassique, que surmontent, le long de la mer, des falaises crayeuses. Entre ces falaises crayeuses et le jurassique, se trouve le banc de gault, formé, à la partie supérieure, d'argile plastique noire ou grise très compacte (argile de Folkestone), épaisse de 3 à 4 m. et, au-dessous, d'une couche de sable vert glauconieux, souvent aquifère, épaisse seulement de quelques centimètres. C'est entre l'argile et le sable vert, dans une couche de passage entre l'aptien et l'albien, que se développe le banc de nodules phosphatés, d'une épaisseur allant jusqu'à 15 cm, mais se réduisant le plus souvent à 4 ou 5 cm, ou même disparaissant tout à fait.

Les nodules, empâtés dans l'argile très tenace du gault, sont formés, soit de concrétions amorphes, soit surtout de débris fossiles, parmi lesquels dominent des Ammonites, des *Arca* et des *Ostrea*.

¹ Page 649 et 660.

² *Statist. de 1905*, p. 243.

On évalue l'étendue du gisement à 600 hectares. Le mètre cube extrait contient, en moyenne, 400 kg. de nodules lavés.

Au même niveau, en Angleterre, les couches de *Folkestone*, à Douvilleiceras Mamillare, sont riches en nodules phosphatés et pyriteux.

Ardennes (albien, 35)¹. — Sur l'initiative de Meugy, l'exploitation des phosphates albiens fut organisée en 1855 près de Grandpré (Ardennes) et, plus tard, étendue aux régions voisines. Une enquête de 1886 a évalué à 24 MT les phosphates de ce niveau, sur lesquels on a presque cessé de travailler après en avoir extrait 2 MT.

L'albien de la Meuse et des Ardennes comporte, à la base, un premier niveau à nodules, ou *coquins*, correspondant aux couches du Boulonnais à Douvilleic. Mamillare. Plus haut, la partie supérieure du gault argileux contient, dans l'Argonne, un autre cordon de nodules bruns phosphatés à plus forte teneur (Talmats).

L'épaisseur des sables verts varie de 25 à 45 m.; leur horizontalité est très grande. Le phosphate du niveau inférieur s'y rencontre ordinairement sous forme de rognons arrondis, lisses ou mamelonnés, dont la grosseur varie de celle d'une noix à celle du poing; ils sont compacts, grisâtres ou brun verdâtre à la surface, et offrent fréquemment des reflets métalliques dans leur cassure; leur dureté est généralement supérieure à celle du calcaire. On y voit la concentration du phosphate autour de corps organiques divers, spongiaires, bois fossiles, coquilles. Tantôt ils sont isolés dans le sable, tantôt ils sont soudés les uns aux autres, et même, dans le canton de Vaubécourt, ils forment une masse continue à contours irréguliers intercalée dans les sables verts.

L'épaisseur de la couche est toujours faible, mais assez variable; elle descend rarement au-dessous de 5 cm. et ne s'élève guère au-dessus de 25 cm. La production a varié de 500 à 1 400 t. par hectare.

Les nodules ont une densité très inégale. En moyenne, le poids du mètre cube est de 1 350 à 1 600 kg. Ils sont formés par du phosphate de chaux, du carbonate de chaux, du sable vert, de l'argile, de l'oxyde de fer et des matières organiques. La richesse moyenne est de 18 p. 100 d'acide phosphorique, ou de 39 p. 100 de phosphate de chaux.

Drôme² (Saint-Paul-Trois-Châteaux, albien, 35). — Les sables verts, qui forment la base de l'albien, renferment, dans la Drôme, sur les communes de *Saint-Paul-Trois-Châteaux* et de *Clansayes*, un gisement de phosphate de chaux, dont on a estimé la surface totale à 100 hectares. Ce gisement a fourni, entre 1868 et 1885, environ 7 à 8 000 t. de phosphates par an. Les nodules se présentent, non suivant une couche unique, mais suivant une série de lits, d'épaisseur très variable, échelonnés sur une hauteur totale de 6 à 12 m. Les sables albiens, reposant sur la marne aptienne, sont entièrement composés de graviers et de

¹ Coll. Ec. d. M., 1659 (Grandpré), 2818 (Apremond), 2820 (Novion). — *Statistique de 1886*, p. 280. — MT : 1 000 000 de tonnes.

² *Statistique de 1886*, p. 265.

sables quartzeux à grains arrondis, très meubles. La teneur du phosphate est, après débourbage, de 38 à 55 p. 100 de phosphate tribasique.

Ardèche, Ain, etc. (albien, 35). — Dans l'Ardèche, le même niveau est exploité sur la commune de Viviers¹, notamment à *Saut-de-l'Égue*. La superficie à Saut-de-l'Égue est d'environ 40 hectares. Le cube total était estimé, en 1886, à 60 000 t.

Au-dessus des grès verts, l'argile du Gault renferme fréquemment des phosphates; en particulier aux environs de *Bellegarde (Ain)*², à la perte du Rhône.

Le même étage albien à phosphates se retrouve à Cosne (Nièvre), à Vailly, près de Sancerre, à Ceton et à Cauville, en Normandie.

Hors de France, l'étage albien renferme également des gisements considérables de phosphate de chaux, surtout dans l'Allemagne du Nord, à Greisswald, en Poméranie, près du rivage scandinave, en Bavière, en Suisse (Vaud, Schwitz, Appenzell), etc. Nous dirons tout à l'heure quelques mots de ceux de Russie.

4° NODULES SUPRA-CRÉTACÉS (36 à 40)

Pernes et Fauquembergues (Base du cénomaniens, 36). — Quand on s'écarte vers le Nord-Est du Boulonnais, on voit l'albien passer à un mince conglomérat, puis disparaître. De ce côté, la transgression ne s'est faite qu'à l'époque cénomaniens et son début est marqué par un niveau à phosphates, comme l'était ailleurs la base de l'albien. Il est visible que les eaux cénomaniens ont recouvert ici un continent longtemps émergé, avec toutes ses irrégularités et ses dépressions. Les dépôts crétacés commencent ainsi par un poudingue glauconieux à galets de quartz primaires, que les mineurs du Nord appellent *tourtia*. Souvent ce *tourtia* passe à des sables verts ou à des marnes glauconieuses, avec nombreuses dents de squales et nodules phosphatés. C'est ce qui se produit, par exemple, du côté de Pernes.

A cet endroit, la coupe est la suivante. Sous 0,50 cm. de terre végétale, on rencontre d'abord la craie fendillée à silex et la craie marneuse, puis une certaine épaisseur de marne compacte, sous laquelle viennent les sables verts et les glauconies, et enfin le banc de nodules de 15 cm. à 1 m. Entre ce banc de nodules et le *thun* (schistes violacés dévoniens très durs), se trouve un lit d'argile de 5 à 30 cm. d'épaisseur, représentant tout l'étage du gault à Pernes.

L'étendue exploitable du gisement de *Pernes* a été évaluée à environ 210 hectares, représentant à peu près 450 000 t. de phosphates lavés.

Les travaux ont commencé vers 1877; la production, aujourd'hui arrêtée, était, en 1886, de 12 600 t.

Ces phosphates ne sont pas durs et porcelainés comme la plupart de ceux du même niveau, mais poreux et très friables. Ils sont, en outre, très

¹ *Statistique* de 1886, p. 266.

² 1871. GRUNER. *Sur les nodules phosphatés de la perte du Rhône* (B. S. G. F. 2^e, t. 28, p. 62).

riches en acide phosphorique (23 à 25 p. 100); leur teneur en potasse atteint 4,5 p. 100 et celle en matières organiques 3 p. 100.

Cénomaniens de France (36). — Les mêmes conditions, qui ont déterminé un dépôt de phosphates à la base du cénomanien dans le Pas-de-Calais, se retrouvent parfois ailleurs au même niveau. Signalons seulement une petite couche de nodules noirs et brillants, située dans la bordure orientale du bassin parisien et développée notamment à l'Ouest de l'*Argonne*. Cette formation se retrouve dans la *Sarthe* et dans le *Cambridgeshire* en Angleterre. Sa puissance est toujours faible (15 à 20 cm. seulement); mais les nodules sont assez riches (50 à 55 p. 100) de phosphates. A un niveau stratigraphique plus élevé, les phosphates disparaissent, pour l'ensemble de l'Europe Occidentale, dans les dépôts crayeux de mer déjà profonde qui marquent la transgression cénomaniennne. Nous allons, au contraire, étudier en Russie d'importants phosphates cénomaniens.

Phosphates albiens et cénomaniens de la Russie centrale¹. — Les mêmes conditions, qui ont amené dans l'Europe Occidentale le grand développement des phosphates albiens semblent, si les déterminations d'âge sont bien exactes, avoir commencé à la même époque en Russie, sur la Volga, mais s'y être surtout accentuées plus à l'Ouest un peu plus tard, au début du cénomanien. Là également on voit, sur un socle antérieurement émergé, dont l'affaissement commence, de premiers dépôts terrigènes où se concentrent les phosphates, suivis par un approfondissement progressif, dans lequel se sont accumulées de vastes épaisseurs de craies (fig. 101).

Dans la Russie Centrale, sur le socle primaire, déjà recouvert de quelques sédiments jurassiques, la mer de l'albien revient déjà occuper d'assez vastes étendues : sur la Volga (Simbirsk, Saratov) et jusqu'à 40 km. Nord de Moscou. Ces couches albiennes transgressives contiennent, par exemple à Simbirsk, des terrains à radiolaires avec nodules phosphatés. Mais c'est surtout au début de la grande transgression supracrétacée que se sont accusés ces facies à phosphates. On a, de Smolensk à Koursk, Kharkov, Voronège et à la Volga, de vastes zones crayeuses rattachées au cénomanien, à la base desquelles se trouve à peu près partout, du moins sur les bords Nord et Est, le même niveau de sables meubles à nodules gris, noirs ou verdâtres, donnant des phosphates à teneur généralement médiocre (de 30 à 35 p. 100) et par suite inutilisés, mais représentant des cubes notables. Comme dans beaucoup de gisements précédents, on trouve, avec le phosphate, une matière noire organique dégageant au choc une odeur de résine. Enfin le turonien de la Volga contient encore, près de Saratov, des grès et marnes à phosphorite riches en spongiaires.

¹ Coll. Ecole des Mines, 1871 (Briansk); 1886 (Moscou); 1907 (Voronège); 1898 (Tambov); 1860 (Koursk); 2002 (Simbirsk); 2003 (Archangelk); 2004 (Vologda); 2005 (Riazan); 2006 (V.atka); 2007 (Kinechma); 2008 (Tatarovo, Moscou). — 1850. КИРЯНОВ. (Gazette de Koursk). — 1861. SOLSKI. (Revue agricole). — 1873, YERMOLOV. *Recherches sur les gisements de phosphate de chaux fossile en Russie* (Saint-Petersbourg), résumé dans les *Gîtes métallifères*, t. 1, p. 380 à 387. — 1878. *Les richesses minérales de la Russie d'Europe*, p. 29. — 1888. PENROSE. *Phosphate of lime*, p. 112.

Nous allons décrire la zone phosphatée centrale, dont les affleurements peuvent être reconnus sur près de 600 km. de long, en la parcourant de l'Ouest à l'Est.

Le crétacé supérieur forme, dans la Russie centrale, une sorte de bassin qui, au Nord, vers Smolensk, Orel, et Voronège, repose sur le dévonien avec intercalation d'un peu de supra-jurassique et qui, au Sud, est limité, de Kiev à Iekatérimoslav, par des roches granitiques. Du côté Nord se trouvent des gisements phosphatés, qui s'étendent sans interruption des

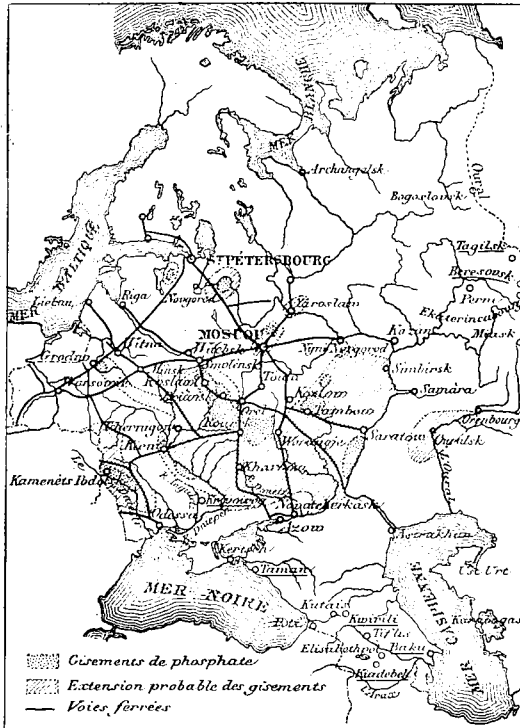


Fig. 101. — Carte des gisements phosphatés de Russie.

rives de la Desna aux rives du Don. Ce sont ceux que nous allons suivre.

En commençant par l'Ouest, à *Roslavl* (100 km. S.-E. de Smolensk), on voit affleurer un sable meuble à nodules, tantôt siliceux et d'un gris verdâtre, tantôt argileux et d'un noir terreux, tenant 31 à 50 p. 100 de phosphates. La couche à nodules de 0,15 à 0,30 m. est recouverte par des marnes siliceuses contenant encore des nodules, puis par de la craie blanche.

De *Briansk* à *Orel*, l'affleurement se poursuit avec des phosphates noirâtres dans des conditions analogues.

A *Koursk*, le phosphate est sous forme de dalles ou d'une couche de pierre de taille ayant 0,20 m. d'épaisseur, plate et lisse en haut, rugueuse

en dessous, et continuée par des rognons et nodules s'enfonçant dans le sable servant de lit. Ces couches contiennent un grand nombre de restes d'animaux et des débris fossiles. Leur teneur est d'environ 30 à 38 p. 100. Puis, vers le Sud, le phosphate disparaît sous d'épaisses assises de marne et de craie pour reparaître plus au Sud à *Kharkov*.

A l'Est, vers *Voronège*, on retrouve également les conditions de gisement de Koursk.

Yermolov a autrefois envisagé cette zone comme renfermant 15 à 20 000 t. de minerai à 35 p. 100 par hectare.

Au N.-E., à *Tambov*, le phosphate est sous une couche de grès vert à grains de glauconie et à parcelles de mica tenant également de l'acide phosphorique. En haut, est un banc de nodules, terminé à la base par une couche de blocs concrétionnés de phosphate. Au-dessous, est un sable meuble, d'un brun verdâtre, contenant des phosphates et des nodules. La couche principale de 0,60 m. consiste en dalles, en blocs et en nodules épars, pouvant représenter, paraît-il, 30 à 60 000 t. de phosphate à 44 p. 100 à l'hectare.

Enfin, à *Saratov*, un lit de phosphate, en tout semblable à ceux du gisement central, existe près de la Volga. La couche de phosphate, de 0,30 m. d'épaisseur, repose dans du sable verdâtre, au-dessous d'une forte couche de craie blanche, dont la base tient de nombreux nodules disséminés. Les nodules sont d'un beau noir, à cassure terreuse et contiennent 17 p. 100 d'acide phosphorique, ou 32 p. 100 de phosphate de chaux. La couche abonde en débris organiques¹.

Turonien de la Sarthe (37). — Le facies des craies phosphatées, qui devient si important dans le sénonien (38,39), apparaît parfois déjà dans le turonien (37).

La craie turonienne ne renferme que rarement, en France, les phosphates à l'état de nodules isolés, mais elle est souvent un peu phosphatifiée dans son ensemble, et beaucoup des couches crayeuses à *Inoceramus labiatus* contiennent, dans le Nord de la France et dans la Sarthe, une proportion de phosphate de chaux qui va jusqu'à 2 et même 3 p. 100.

Un dépôt phosphaté du turonien supérieur a été signalé près de *Conneré* (Sarthe), entre la craie à bryozoaires et la craie noduleuse à *O. Columba*².

Les nodules y sont très gros, de près de un kilogramme souvent, à surface verte avec glauconie à l'intérieur, mais pauvres en acide phosphorique.

Dans le même département, le facies à nodules se prolonge dans le sénonien à Saint-Paterne, Dissay et Château-du-Loir, pendant une période où nous allons voir, dans le Nord-Est de la France et la Belgique, les phosphates prendre le type des craies phosphatées.

¹ On connaît en Russie des phosphates tertiaires : notamment vers Kiev et Podolsk, dans le bartonien. Nous avons signalé plus haut, page 664, les nodules phosphatés noirs siluriens de Podolie.

² 1872. GUILLIER. *Sur les couches à phosphates de chaux découvertes dans la craie de la Sarthe* (B. S. G. F., 2^e, t. 17, p. 157).

D. — CRAIES PHOSPHATÉES SÉNONIENNES (38, 39)

Généralités. — En atteignant la période sénonienne, nous voyons se développer un faciès de dépôts phosphatés très différent de celui qui avait prédominé jusqu'alors : celui des craies phosphatées formant des bancs épais et continus sur de très grandes étendues. Ces bancs, à teneur généralement médiocre, renferment, par endroits, des zones plus riches, où la teneur devient utilisable et ils ont, d'autre part, subi, dans certains cas, sur les affleurements, des concentrations secondaires, qui sont l'origine des sables phosphatés à haute teneur, ou tout au moins de certaines craies enrichies. Ce type de gisements n'a guère commencé à jouer un rôle dans l'industrie des phosphates que depuis 1883 ; mais, peu à peu, ce rôle est devenu tout à fait prédominant avec l'entrée en jeu successive des phosphates de la Belgique et du Nord de la France appartenant au sénonien, puis de ceux de l'Algérie et de la Tunisie qui sont éocènes. Si nous laissons de côté les sables d'enrichissement local (rencontrés pour la première fois à Beauval en 1886), la teneur moyenne des premières craies explorées aux environs de Mons était seulement de 25 p. 100, à une époque où l'on n'envisageait guère comme utilisables que les phosphates à 50 p. 100 ; et les procédés d'enrichissement mécanique parurent d'abord d'un emploi difficile. Aujourd'hui, la Belgique produit environ 300 000 t. de phosphates à 50 p. 100 venant de la craie sénonienne et les 2 000 000 t. de la production française, algérienne et tunisienne, à même teneur, viennent à peu près exclusivement de craies semblables, sénoniennes ou surtout éocènes.

Sénonien (Aturien, 39) de Picardie ¹. — On connaît, dans les départements du Pas-de-Calais, de l'Aisne, de la Marne et de l'Oise, de nom-

¹ Coll. Ecole des Mines, 1861 (Hardivillers) ; 2056 (Beauval). — 1849. BUREUX. *Esquisse géologique du département de la Somme*. — 1863. DE MERCEY. *Craie phosphatée de Beauval* (B. S. G. F., 2^e série). — 1867. DE MERCEY. (Mémoires de la Société linéenne du Nord). — 1878. BARROIS (Ann. Soc. géol. Nord, p. 447). — 1886. VION. *Les phosphates de la Somme* (Soc. linn. du Nord de la France, n^o 174, p. 187. Amiens). — 1886. STAN. MEUNIER. *Les phosphates de Picardie* (La Nature, n^o 712, p. 113). — NAUTIER. *De l'enrichissement de la craie phosphatée et de l'origine du phosphate riche de Beauval* (C. R., t. 108). — 1887. DE MERCEY. *La craie phosphatée à Belemnitella quadrata dans le Nord de la France* (B. S. G. F., 3^e série, t. 15, p. 719 et C. R., t. 105, p. 1135). — 1889. H. LASNE. *Notes sur les phosphates de Beauval et d'Orville* (Mém. Soc. Ing. civ.). — 1889. LADRIÈRE et CAYEUX. *Phosphate d'Orville* (Ann. Soc. géol. Nord, t. 16). — CORNET. *Les gisements de phosphate de chaux de la craie de Mezières* (Ann. de la Soc. géol. de Belgique, t. 15, Liège). — 1889. STAINIER. *Etude géologique des gisements de phosphate de chaux du Cambrésis* (Mém. Soc. géol. de Belg., t. 16, p. 3, Liège). — 1889. DENYS. *Phosphate de chaux dans la craie d'Obourg, près Mons* (Ann. Soc. géol. Belg., t. 15, Liège). — 1889. J. LAROMIGUIÈRE. *Phosphates de la Somme* (Bull. Soc. hist. nat. de Toulouse). — 1889. LADRIÈRE. *Sur les dépôts phosphatés de Montay et de Forest (Nord)* (C. R., t. 107, p. 960). — 1889. GOSSELET. *Phosphate de chaux du Nord de la France* (Soc. géol. du Nord, année 16 et Bull. Soc. géol. Belg., t. 3, p. 287). — 1889. DE MERCEY. (Ann. Soc. géol. Nord, t. 16, p. 211). — 1890. LASNE. *Terrains phosphatés des environs de Doullens* (B. S. G. F., 3^e, t. 17, p. 441). — 1890. CAYEUX. *Sur le crétacé des environs de Péronne* (Ann. Soc. géol. Nord, t. 17, p. 227). — 1890. GOSSELET et CAYEUX.

breuses zones occupées par de la craie phosphatée sénonienne appartenant à l'assise à *Act. quadratus*, dont la coupe ci-jointe montre la place stratigraphique.

Danien (40).		Tuffeau de Cibly.	
Sénonien supérieur. (Aturien 39) (craie à bélemnites).	} Maestrichtien.	Craie à <i>Bel. mucronata</i> (tuffeau de Maestricht).	
		} Campanien.	Blanc de Meudon. Craie phosphatée de Cibly. Lignites de Fuveau.
			Craie à <i>Actinocamax quadratus</i> . Craie phosphatée de Picardie et de Taplow.
Sénonien inférieur. (Emschérien, 38).	} Santonien } Coniacien.	Craie à <i>Micraaster coranguinum</i> (craie de Douvres, Villedieu, etc.).	

Cette craie phosphatée paraît occuper une série de synclinaux anciens, dont le remplissage s'est fait à une petite distance des côtes et sous une faible profondeur d'eau, avec des matériaux en grande partie terrigènes¹. On la voit affecter la forme de lentilles pouvant atteindre 1 000 m. de long sur 2 à 300 m. de large, avec une épaisseur centrale de 20 m. Ces lentilles ont souvent été déprimées à leur partie supérieure par la surcharge des autres terrains. D'ordinaire, elles débutent à la base, comme la plupart des formations semblables, par une mince couche à nodules riches pouvant contenir jusqu'à 80 p. 100 de phosphate tribasique. Au-dessus vient la craie, dite *brune* ou *piquetée*, dans laquelle de petits grains bruns, pour la plupart phosphatés, introduisent une teneur en phosphates qui varie de 10 à 50 p. 100 suivant les endroits.

Gosselet a même montré qu'en certains points, où il y avait plusieurs bancs de craie phosphatée riche séparés par des craies pauvres, chacune des couches riches commence par un conglomérat de nodules durs, roulés, vernissés et perforés, reposant sur un banc de craie pauvre durcie et perforée par les lithophages. Cela implique : 1° dépôt de craie phosphatée pauvre sous une très faible profondeur (cette craie renfermant des récifs coralliens); 2° durcissement, qui marque tout au moins un arrêt dans la sédimentation; 3° perforation par les organismes; 4° éro-

(Ann. Soc. géol. Nord, t. 18, p. 156, avec réponse de de Mercey, *ibid.*, t. 19, p. 52). — 1891. DE MERCEY. *Sur les gîtes de phosphate de chaux de la Picardie* (B. S. G. F., 3^e, t. 19, p. 854). — 1892. MUNIER-CHALMAS. *Origine des phosphates de la Somme* (B. S. G. F., t. 21 mars). — 1893. LASNE. *Terrains phosphatés des environs de Doullens* (2^e note) (B. S. G. F., 3^e, t. 20, p. 211). — 1900. CORNET. *Gis. de ph. de chaux de Baudour* (Liège. Ann. Soc. géol. belge, 35 p.). — 1891. RENARD et CORNET. (Bul. Ac. Roy. Belg.). — 1896. GOSSELET. *Note sur les gîtes de phosphate de chaux d'Hem-Monacu, d'Elaves, du Pontlieu, etc.* (Ann. Soc. géol. du Nord, t. 24, p. 109; C. R., 3 août 1896, p. 290; B. S. G. F., t. 24, p. 878). — 1896. PRIEM. *Sur les poissons de la craie phosphatée des environs de Péronne* (B. S. G. F., 3^e, t. 24, p. 9 à 23). — 1902. GOSSELET. *Observations sur la craie phosphatée de la Somme* (B. S. G. F.; C. R., 3 fév. 1902, p. 19 et 20). — 1901. DE GROSSOUVRE. *Recherches sur la craie supérieure* (Mém. carte géol.).

¹ On a renoncé aux anciennes théories qui supposaient la craie formée dans les grandes profondeurs marines. De Grossouvre place cependant la craie blanche à la limite entre la zone littorale profonde et la zone pélagique.

sion, qui s'est attaquée à la couche dure et en a roulé les fragments ; enfin 5°, apport abondant de matière phosphatée riche.

Les dents de poissons abondent (*Ptychodus*, *Otodus*, *Lamna*), comme dans beaucoup des dépôts phosphatés que nous étudions ici¹. Quand on examine les grains phosphatés, dont le diamètre ne dépasse guère un dixième de millimètre, on y voit du fluophosphate radié englobant de nombreuses esquilles d'os de poissons et de reptiles, des dents microscopiques de poissons, etc. On peut donc considérer que des accumulations d'organismes en décomposition ont donné une sorte de liqueur phosphatée englobant les précipités sédimentaires.

La surface occupée par des lambeaux demeurés intacts de cette craie phosphatifère, est très considérable.

Cette craie phosphatée pauvre, dont nous allons retrouver l'équivalent un peu plus récent en Belgique, a souvent subi un enrichissement à la base, au-dessus de la couche à nodules. Ailleurs sa teneur atteint 35 à 40 p. 100 et la rend utilisable, mais à la condition d'employer, en profitant de sa friabilité, des procédés d'enrichissement artificiel pour l'amener à une teneur marchande de 50 p. 100².

Après avoir essayé sans succès de divers procédés chimiques, on est revenu aux procédés de classement par courant d'air ou par lévigation.

Le procédé le plus simple consiste à soumettre la craie pulvérisée à un courant d'air ascendant assez énergique pour enlever la farine crayeuse et laisser cependant retomber les grains phosphatés. Avec de la craie à 37 p. 100, on enrichit à 50 p. 100 en perdant presque un tiers du phosphate.

Quelquefois on a recours (usine Solvay) à une légère calcination suivie d'un broyage dans l'eau et d'une préparation mécanique au moyen de trommels, pompes centrifuges et caisses de décantation. Après quoi, on sèche en faisant tomber la farine sur des tubes de 0,15 m. traversés par les flammes d'un foyer et on broie de nouveau. Ce procédé est plus coûteux que le précédent ; mais il donne lieu, en revanche, à des pertes moindres et permet de réaliser des teneurs de 50 à 55 p. 100 avec une teneur initiale de 25.

Cette préparation mécanique, qui industriellement est coûteuse et limitée, s'est trouvée, en certains points d'élection, réalisée par la nature sous forme de concentration chimique et poussée jusqu'à une teneur de 75-80 p. 100. Telle est l'origine des *poches à sables phosphatés*, dont la première découverte, en mai 1886, aux environs de Doullens (Somme), a fait sensation.

L'histoire de cette industrie a marqué, entre la découverte géologique et la mise en valeur industrielle, un long retard que nous retrouverons également pour les phosphates nord-africains.

Dès 1849, Buteux avait signalé ces sables phosphatés ; mais, n'ayant fait analyser que certains noyaux contenus dans le phosphate sableux, n'avait trouvé que 13,5 d'acide phosphorique. En 1863 et 1867, de

¹ Voir plus haut, page 647, note 1.

² La difficulté de l'enrichissement vient de ce que les grains phosphatés eux-mêmes ne contiennent pas beaucoup plus de 60 p. 100 de phosphate. — Voir LEVAT (Ann. d. M. 1895, p. 150 à 162).

Mercey les décrit de nouveau comme exploitables. Enfin, en 1886, Mesle, ayant analysé un sable employé depuis longtemps pour donner aux briques une patine violette, y trouva 78 p. 100 de phosphate de chaux.

Les principaux gites sont (fig. 102) : Au Nord-Ouest et au Nord d'Auxi-le-Château, Haravesnes, Bachimont, Buire-au-Bois et Nœux (Pas-

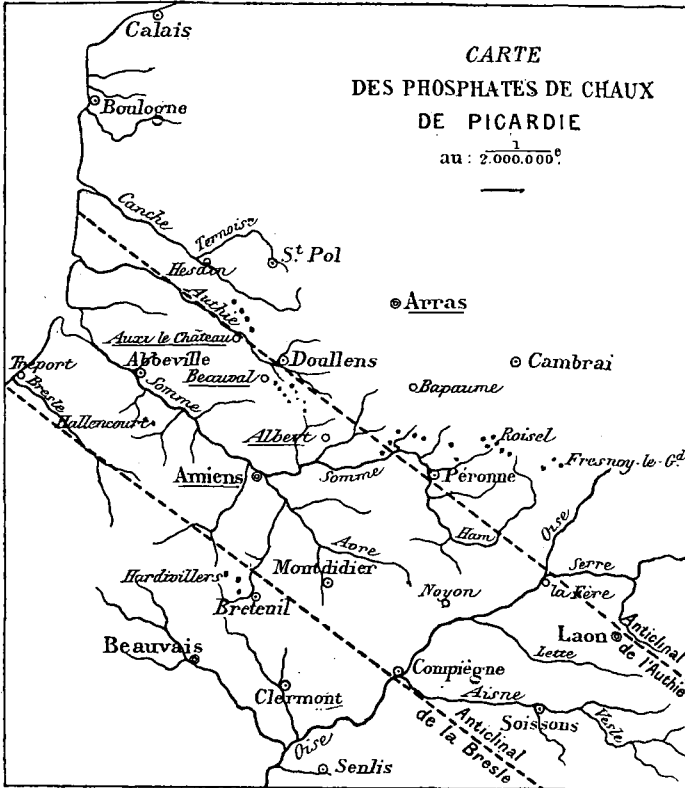


Fig. 102.

de-Calais) ; au Sud et Sud-Ouest de Doullens, Beauval, Beauquesne, Tcr-ramesnil (Somme), Orville (Pas-de-Calais), Raincheval, Puchevillers et Toutencourt (Somme) ; au Sud-Ouest d'Albert, Ribemont-sur-l'Ancre ; entre Bray-sur-Somme et Péronne, Suzanne, Frise, Curlu, Hemmonacu, Bouchavesnes ; au Nord-Est de Péronne et vers Roisel, Templeux (Somme), Hargicourt, Méricourt et Etaves (Aisne) ; plus au Sud, Hardivillers et Breteuil (Oise), etc.

En tous ces points, on retrouve les mêmes caractères. Des poches localisées sont remplies de sables phosphatés enrichis. Leurs parois, très nettes, sont tantôt phosphatées, tantôt dépourvues de phosphates. Au-dessus s'étend, sur plusieurs mètres d'épaisseur, l'argile rouge dite *bief à silex*.

La concentration superficielle, dont les caractères sont incontestables, paraît s'être exercée particulièrement sur les points où la craie phosphatée était le plus en saillie : c'est-à-dire sur les zones d'intersection, entre les synclinaux pré-sénoniens, dans lesquels cette craie s'était accumulée de préférence et des anticlinaux résultant de mouvements postérieurs.

L'attaque chimique de ces dômes crayeux a dû commencer à l'époque tertiaire¹ dans les conditions ordinaires des poches de décalcification, appliquées ici à une craie phosphatée. Après quoi, le tout a été recouvert d'argile à silex et de limons et n'a reparu que là où le ravinement, dont résulte l'orographie actuelle, a remis ces poches à jour sans les détruire. Tout cet ensemble de circonstances compliquées explique la rareté relative des points où apparaît un phénomène, qui a dû présenter, au moment où la concentration s'est effectuée, une bien plus grande extension.

La préparation industrielle des sables phosphatés consiste dans une dessiccation sur plaques de tôle chauffées et une mouture en poudre impalpable. On ne les emploie pas en engrais naturels, mais en superphosphates.

Dès 1887, on a extrait à Beauval plus de 20 000 t. de phosphate valant 900 000 fr., et, à Orville, plus de 35 000 t. valant 1 600 000 fr.

De 1886 à 1894, pendant la période de l'essor principal, la Somme a produit 1 400 000 t. de phosphate à 50 francs. En ajoutant les départements du Nord et l'Oise, le Nord de la France a, dans cette même période, fourni 3 500 000 t. de craie et de sables phosphatés.

Sénonien (39) de Belgique (Mons, la Hesbaye)². — Nous retrouvons en Belgique, avec un grand développement, les craies phosphatées sénoniennes, qui ici appartiennent au sommet du campanien.

Dans le Sud de la Belgique, en Hainaut, l'aturien (campanien) comprend un poudingue, dit de Cuesmes, passant à un lit de nodules, sur lequel vient une assise de craie phosphatée épaisse de 20 à 25 m. qui, dans son ensemble, est grise et grossière, mais que piquent de nombreux petits grains bruns, pour la plupart phosphatés, formant 75 p. 100 de la marne. C'est ce qu'on appelle la *craie brune* (niveau à Bel. *Mucronata*).

¹ Ce phénomène d'altération continentale a été supposé prétertiaire par Gosselet, pléistocène par Munier-Chalmas. Il semble bien en rapport avec la formation du bief. Nous nous contentons de mentionner l'idée inadmissible d'une décalcification produite par infiltration actuelle d'eaux pluviales sous l'argile.

² Coll. Ecole des Mines, 1656. — 1874. NIVOIT. *Sur les phosphates de chaux de Ciplly* (C. R., 1874, t. 79; Cuyper, t. 38, p. 236). — 1877-78. BRIART et CORNET. *Sur la craie brune phosphatée de Ciplly* (Ann. Soc. géol. de Belgique, t. 5). — 1878. A. PETERMANN. *Seconde note sur les gisements de phosphates en Belgique et particulièrement sur celui de Ciplly* (Mém. publ. par l'Ac. roy. des sc. de Belgique, t. 28). — CORNET. *Sur l'époque de l'enrichissement des phosphates de chaux aux environs de Mons* (Ann. de la Soc. géol. de Belgique, t. 13). — CORNET. *Sur l'âge du tufeau de Ciplly* (Ann. Soc. géol. de Belgique, t. 15). — 1884. H. LASNE. *Sur la composition des phosphates des environs de Mons* (Ann. Soc. géol. du Nord, t. 17, p. 141). — 1888. PENROSE. *Phosphate of lime*, p. 102. — 1897. CESARO. *Descrip. des minerais phosph., sulf. et carbonatés du sol belge* (Mém. Ac. Bruxelles, 136 p.). *Phosphates de la Malogne à Cuesme* (Belgique), p. 7. — 1908. TIETZE. (Z. f. B. H. u. S. W.). — CORNET et BRIART. (B. S. G. Fr., 3^e, t. 2, p. 544). — RUTOT et VAN DEN BROECK. (Ann. Soc. géol. belge, t. 12 et 13; cf. B. S. G. F., 3^e, t. 15, p. 157). — 1894. RUTOT. (B. S. géol. belge, t. 8, p. 145).

Le tout est surmonté par un calcaire blanchâtre ou jaunâtre avec quelques rognons de silex gris et nombreux bryozoaires, dit tuffeau de Cibly, qui paraît englober depuis le haut de l'aturien (tuffeau de Maestricht ou Maestrichtien) jusqu'au Montien (calcaire de Mons). Cette craie fournit surtout des craies phosphatées à faible teneur (25 p. 100 en moyenne, parfois 30 à 40). Au-dessus, le tuffeau débute d'ordinaire par un gravier ou cailloutis à nodules phosphatés et fossiles roulés de la craie, dit poudingue de la Malogne, qui met en évidence une discordance légère. A ce poudingue phosphaté correspond la couche à coprolithes de la montagne Saint-Pierre. Vers l'Est, dans la Hesbaye (région de Liège), le même niveau campanien débute par des sables verts et se continue par de la craie phosphatée plus riche.

Les procédés d'enrichissement, indiqués à propos de la Picardie, s'appliquent également ici.

Sénonien d'Angleterre (Taplow)¹. — En Angleterre, on a signalé à Taplow, dans l'aturien (39), un lambeau de craie brune à phosphates, analogue à la craie phosphatée de Doullens.

Sénonien de Palestine (Es-Salt)². — L'attention a été très vivement attirée, depuis quelques années, sur les phosphates de la Palestine, qui ont paru d'abord comparables à ceux de Tunisie, mais où, en définitive, on n'a pas encore rencontré la matière d'une exploitation fructueuse. Ces phosphates, situés sur la route de caravanes allant de Jérusalem à Amman, se trouvent sur le 32^e degré, à environ 20 km. E. du Jourdain, dans les mêmes terrains sénoniens où sont englobés les bitumes et asphaltes précédemment décrits³.

Les gisements sont de deux natures : sédiments normaux ne dépassant pas 40 à 45 p. 100 et poches d'enrichissement à allure filonienne tenant jusqu'à 80 p. 100, dont la haute teneur avait d'abord été attribuée à l'ensemble.

Le sénonien phosphaté se compose de calcaires avec bancs et noyaux siliceux dus, au moins en grande partie, à une silicification postérieure. Les couches à phosphates, manifestement détritiques, sont formées de débris organiques, de particules d'apatite et de calcite avec un ciment siliceux plus ou moins développé. Leur teinte ordinaire est grise. En plusieurs points, on a reconnu 3 m. d'épaisseur avec une teneur de 47 à 48 p. 100. Leur origine première paraît être une formation saumâtre.

D'autre part, le long des failles et des dislocations, il y a eu remise en mouvement et recristallisation d'apatite riche à teintes roses, rouges, vertes, etc., ressemblant un peu aux apatites de Norvège, qui tire manifestement son origine des sédiments antérieurs. Sur ces zones d'enrichis-

¹ 1896. M. STRAHAN. *Craies phosphatées d'Angleterre* (Quart. journ. géol. Soc., t. 47. p. 356, août 1891 et t. 52, p. 463, août 1896).

² COULANT. Carte en 1 : 5 000. — 1903. BLANCENHORN. *Ueber d. York. v. Phosphaten, Asphaltkalk, und Petroleum in Palästina und Ägypten* (Z f. pr. G., p. 294). — 1911. KAUSCH. *Die Phosphallag. bei Es-Salt im Ost Jordanlande* (Z f. pr. G., p. 397 à 406. avec carte).

³ Voir plus haut page 604.

sement on constate une diminution très nette de la teneur avec la profondeur : ce qui accuse une concentration d'origine superficielle et probablement récente. L'enrichissement a donné aussi ailleurs (Djebel Abou-el-Bevati) des sables phosphatés à 78 p. 100 rappelant ceux de la Somme.

E. — CRAIES PHOSPHATÉES TERTIAIRES

1° ALGÉRIE ET TUNISIE (ÉOCÈNE, 41)

Le type des craies phosphatées que nous venons de rencontrer très développé dans le Nord de la France et en Belgique à l'époque sénonienne se reproduit à l'époque éocène inférieure (suessonien) dans tout le Nord de l'Afrique (Tunisie et Algérie) avec une extension énorme. Ces gise-

¹ Coll. Ec. d. M., 1863 (Souk-Arrhas) ; 1853, 2824 et 2627 (Tebessa) ; 2825 (Dj. Mzeita) ; 2827 (Tocqueville) ; 1295 (Inkermann). — Pour la description détaillée de ces phosphates africains, je renvoie à mes *Richesses minérales de l'Afrique*, p. 206 à 236. — Voir, outre la bibliographie insérée dans le Bulletin de la Société Géologique, à l'occasion de la réunion d'Algérie en 1896, les mémoires suivants : 1885. PH. THOMAS. *Sur la découverte des gisements de phosphates de chaux dans le Sud de la Tunisie* (C. R. Ac. des Sc., 7 déc. 1885 et 9 mai 1887). — 1888. J. ORTLIEB. *Quelques mots sur les roches phosphatées et sur les boues geysériennes de l'Algérie* (Bull. Soc. belge géol. Bruxelles, p. 153-156). — 1888. POMEL. *Le suessonien à Nummulites et à phosphates des environs de Souk-Arrhas* (Ass. française, Congrès d'Oran). — 1890. E. FICHEUR. *Description géologique de la Kabylie du Djurdjura* (thèse de doctorat, Alger). — 1891. THOMAS. *Gisements de phosphate de chaux des hauts plateaux de la Tunisie* (B. S. G. F., 3^e, t. 19, p. 374). — 1891. POMEL et FICHEUR. *Les formations éocènes de l'Algérie* (C. R. Ac. Sc., t. 113, p. 26). — J. BENARD. *Les phosphates d'Algérie et de Tunisie* (Meaux, Le Blondel, in-8^o, 24 p.). — 1892. BLEICHER. *Sur la structure microscopique des roches phosphatées du Dekma* (Constantine) (C. R. Ac. Sc., p. 1022). — 1894. BLAYAC. I. *Description géol. de la région des phosphates du Dyr et du Kouif près Tebessa* ; II. *Note sur les lambeaux suessonien à phosphate de chaux de Bordj Redir et du Djebel Mzeita, près Bordj bou Arréridj* (province de Constantine). (Ann. d. M., 9^e, t. 6, p. 319 à 338). — 1894. PALLARY. *Phosphates d'alumine de Misse Rgheiss ; phosphates des environs d'Oran*, etc. (As. Fr. Av. Sc. Caen, 1^{re} partie, p. 148 ; 2^e partie, p. 431-439). — 1894. D. LEVAT. *Etat actuel de la production et de la consommation des phosphates, gisements de phosphate de chaux et gisements de calamine de la Tunisie* (Assoc. franç. pour l'avanc. des Sc. Congrès de Caen). — 1895. D. LEVAT. *Etude sur l'industrie des phosphates et superphosphates* (Tunisie. Floride. Scories basiques) (Ann. d. M., 9^e, t. 7, p. 1 à 260). — 1895. B. KOSMANN. *Der Phosphat Bergbau von Tebessa in Algerien* (Berg. und Hüt. Z. n^o 49). — 1895. JACOB. *Sur les gisements de phosphate de chaux du plateau de Cheria* (cercle de Tebessa) (Ann. d. M., 9^e, t. 8, p. 237 à 248). — 1895. FICHEUR. *Etude géologique sur les terrains à phosphate de chaux de la région de Boghari* (Alger) (Ann. d. M., 9^e, t. 8, p. 248 à 281). — 1895. FICHEUR et BLAYAC. *Notice sur les terrains à phosphate de chaux de la région de Sidi Aïssa* (Alger) (Ann. d. M., 9^e, t. 8, p. 281 à 290). — 1895. BLAYAC. *Lambeau suessonien de Birin. Le suessonien à phosphate de chaux du Djebel Mahdid près M'Sila* (province de Constantine) (Ann. d. M., 9^e, t. 8, p. 290 à 300). — 1895. MALBOT. *Etude comparée des phosphates algériens* (Ann. Phys. et Chimie ; C. R., t. 121, p. 442-445). — 1896. — CAYEUX. *Sur la constitution des phosphates de chaux suessonien du Sud de la Tunisie* (C. R., t. 123, p. 273). — 1901. GASTU. *Les phosphates de chaux d'Algérie*. Thèse, 176 p. — 1902. PERVINQUIÈRE et BLAYAC. *Sur l'éocène de Tunisie et d'Algérie* (B. S. G. F. ; C. R., 3 fév. 1902, p. 21 à 25). — L. CHATEAU. *Les gisements de phosphate de chaux dans les provinces de Constantine et d'Alger* (Mém. Soc. ing. civils, 120 p. et 2 pl.). — DUJAST. *Les phosphates d'Algérie* (Rev. gén. Sc., 8^e ann., p. 769-783). — L. GRANDEAU. *Les gisements de phosphates de chaux de l'Algérie* (28 p. Ann. Soc. Agron.).

ments ont déjà pris, malgré les difficultés d'accès, une place prééminente sur le marché mondial des phosphates ; ils sont susceptibles de fournir, pendant longtemps, des quantités presque illimitées de cette substance.

Historique. — En 1873, Thomas avait constaté l'existence, dans la région Sud du Tell de la province d'Alger, d'un niveau éocène (suessonien), riche en phosphate de chaux. De 1883 à 1887, le même géologue, puis Fr. Aubert, au cours de ses études sur la carte géologique de la Tunisie, reconnurent la présence de phosphates, également suessonien, dans le Sud de la Tunisie et la région de Gafsa. Dans les années suivantes, on fit quelques essais d'exploitation assez malheureux près de Souk-Arrhas dans le département de Constantine, près de la frontière tunisienne, puis en 1890, du côté de Béja, au Nord de la ligne de Constantine à Tunis, autour du Kef, vers Djebba, etc. Mais c'est seulement en 1892 que l'on organisa les exploitations des environs de Tébessa et, en 1898, celles de Gafsa (fig. 103).

La production se répartit ainsi (1908), en phosphates à 58-63 p. 100 et 63-68 p. 100 de phosphate tribasique, exportés jusqu'au Japon :

ALGÉRIE.	{	Région de Tébessa. Le Kouif et Kouissa.	296 000 t.	} 365 000 t.
		— Bordj-Rédir.	36 000 t.	
		Groupe de Sétif, Tocqueville	29 000 t.	
TUNISIE.	{	Compagnie de Gafsa	899 000 t.	} 1 267 000 t.
		— de Kalaat-Djerda	195 000 t.	
		— du Dyr (Kalaat-es-Senan)	115 000 t.	
		— la Floridienne (Salsala)	8 000 t.	

En 1910, Gafsa a produit 950 000 t. et le reste de la Tunisie 332 000.

Cette production tend constamment à s'accroître et peut aisément suivre les progrès de la consommation mondiale. C'est ainsi qu'à la fin de 1909 l'attention a été attirée sur un nouveau gisement situé à 100 km. Sud de Tébessa, à Djebel Onk qui, d'après les premières estimations, contiendrait 200 MT.

Géologie générale. — Les gisements Nord-africains paraissent s'être déposés dans des eaux peu profondes (moins de 1 000 m.), au voisinage d'une côte, pendant une période d'ingression marine qui, partant du Nord, s'est étendue peu à peu vers le Sud-Est.

On les avait d'abord considérés comme appartenant tous au même étage, situé à la base de l'éocène inférieur ou suessonien (dans le thanétien, 41), au contact du Crétacé, représenté lui-même par des étages divers, souvent par le sénonien (39).

On est porté à croire, aujourd'hui, d'après des observations de Perquinère, que, si les phosphates de Tébessa sont bien de cet âge, ceux de Gafsa sont probablement un peu plus récents et de l'éocène moyen¹.

Dans toute la région de Tébessa, qui a été particulièrement bien étudiée, en raison du grand développement pris par les exploitations depuis 1894, la coupe, très typique, est la suivante, de haut en bas :

¹ Les fossiles sont de type lutétien (44), à l'exception des reptiles qui indiqueraient un âge plus ancien.

COUPE DE LA ZONE PHOSPHATÉE DANS LA RÉGION DE TÉBESSA

- THANÉTIEN
(Suessonien
inférieur).
- C — Calcaire coquillier (lumachelle), dans le Sud de la Tunisie, faisant place à d'épais calcaires nummulitiques dans le centre et le Nord de la Tunisie.
 - B — Niveau à phosphates. Alternances de marnes avec nodules et de calcaires phosphatés¹.
 - A — Limons argileux noirs, de puissance variable (120 mètres au Dyr, près Tébessa), saturés de chlorure de sodium et de gypse, avec silex caractéristiques, noirâtres à l'intérieur, blancs extérieurement (pris par les indigènes pour des ossements pétrifiés).
- *Discordance de stratification.*
CRÉTACÉ. — Etages variables.

Pratiquement, la place du niveau phosphaté, sous les bancs de calcaire coquillier et au-dessus des limons noirs à silex, est très caractéristique et le rend très facile à retrouver.

Théoriquement, l'interprétation immédiate de cette coupe (et des descriptions de détail, par lesquelles elle sera bientôt précisée), c'est qu'après une période d'émersion et un mouvement du sol, caractérisés par la discordance (fréquente mais non constante) entre le crétacé et l'éocène, les eaux de la mer, revenant sur la région algérienne, y ont, d'abord, formé des lagunes tranquilles et peu profondes, où se sont déposés, avec des argiles noires, des produits salins de concentration. Puis, il y a eu un certain approfondissement, sans que la côte se soit notablement éloignée; le caractère marin s'est accentué; on s'est trouvé, au maximum, dans cette zone (dite bathyale par Haug²), où, entre 80 et 900 m. de profondeur, se déposent surtout les boues bleues, riches en matières organiques et en sulfures. C'est le moment où ont dû se précipiter les phosphates. Les conditions, nettement littorales, de la formation phosphatée sont, en effet, caractérisées, partout où on l'observe, par l'entrelacement des couches, aussi bien que par l'abondance des débris organiques. Le fait que les phosphates algéro-tunisiens sont : les uns, ceux du Centre et du Nord, dans l'éocène inférieur; les autres, ceux du Sud-Est, dans l'éocène moyen, paraît indiquer que, pendant la période suessonienne, la mer aurait gagné peu à peu vers le Sud, reportant, de plus en plus loin, dans ce sens, son rivage. Cette transgression de l'éocène moyen, hypothétique à Gafsa, est très marquée au Sud de Mactar.

En ce qui concerne cette question d'âge, Pervinquière a remarqué³ que, dans quelques points privilégiés de l'Algérie comme le synclinal du Dyr, près de Tébessa, fameux par ses phosphates, la sédimentation a dû être continue du crétacé au tertiaire. Sur les calcaires sénoniens à inocérames, reposent alors des marnes bleues ou noires (A de la coupe précédente), atteignant 200 m d'épaisseur au Kalaat-es-Senam⁴ et au milieu

¹ On trouve, fréquemment, avec le phosphate, de la glauconie, c'est-à-dire un hydro-silicate de fer potassique, assez caractéristique des vases bleues, qui marque un rapprochement très habituel du fer et du phosphore dans leurs gisements.

² HAUG. *Les géosynclinaux et les aires continentales* (B. S. G. F., 3^e série, t. 28, p. 621).

³ C. R. S. G. F., 3 février 1902, p. 21.

⁴ Voir plus loin, page 692.

desquelles la limite inférieure de l'éocène est impossible à tracer.

Puis vient le niveau phosphaté de la région de Tébessa (B), dont le fossile le plus typique est un grand nautilus voisin du *N. Forbesi* et qui supporte quelques bancs de calcaire à silex noir ou chocolat (C), où apparaissent de petites nummulites, du reste très rares. Au-dessus d'eux se dresse la masse des calcaires cristallins, très riches en nummulites, parmi lesquelles *N. Rollandi* (Mun. Chalm.) qui appartiennent encore à l'éocène inférieur.

L'éocène moyen peut reposer en concordance sur ces calcaires de l'éocène inférieur, ou être en transgression sur le crétacé (région du Sud de Mactar et probablement région de Gafsa).

Cet éocène moyen débute, dans la région centrale, par des calcaires grossiers, avec quelques intercalations marneuses, où abonde une grande huitre et continue par des marnes très puissantes à *O. bogharensis*.

L'aspect des couches phosphatées de Gafsa est plutôt celui de l'éocène moyen que celui de l'éocène inférieur de la Tunisie centrale; les calcaires à nummulites (C) font défaut au-dessus et divers fossiles recueillis appartiennent à l'éocène moyen.

Pratiquement les phosphates suessonniens Nord-africains, se rattachent à deux types, de valeur tout à fait différente, bien que d'origine presque semblable et à peu près du même âge : 1° les marnes à nodules, exploitées par exemple à Souk-Arrhas, qui n'ont jamais donné de bons résultats et, 2° les craies brunes phosphatées, qui alimentent, au contraire, les grandes exploitations de Tébessa et de Gafsa.

1° Les nodules phosphatés, dont la valeur est très secondaire, se présentent, par couches irrégulières, avec des formes et des dimensions variables, au milieu de marnes feuilletées, contenant souvent des filets interstratifiés de gypse, des nodules de sulfate de strontium et des sels alcalins (c'est-à-dire déposés dans une eau de mer très concentrée), qui alternent, eux-mêmes, avec des bancs calcaires. Ces marnes feuilletées sont onctueuses, grasses au toucher et renferment parfois jusqu'à 7 ou 8 p. 100 d'une matière organique mal étudiée, insoluble dans le sulfure de carbone et la benzine. Les nodules, comparables à ceux que nous avons trouvés si abondamment dans l'infra-crétacé, sont, pour la plupart, arrondis et striés, avec une patine brune et luisante, d'aspect caractéristique, où s'est concentré le phosphate. Dans les gros nodules, cet enduit est même seul phosphaté, l'intérieur étant calcaire; les petits peuvent, au contraire, tenir jusqu'à 70 p. 100 de phosphate tribasique. On s'est demandé, dès lors, si ces nodules ne seraient pas le résultat d'une concentration anciennement opérée sur des terrains calcaires phosphatés, où le phosphate aurait été d'abord disséminé. Le phosphate, emprunté aux fragments calcaires roulés dans une eau très chargée d'acide carbonique, serait entré en dissolution dans cette eau et se serait précipité sur la surface de ces galets.

2° Les craies phosphatées, qui constituent le véritable minerai industriel, alternent avec les marnes à nodules. Ce sont elles que l'on exploite auprès de Tébessa, au Dyr, à Gafsa, au Kalaat-es-Senam, etc. Elles se présentent sous la forme d'une roche assez friable, grenue, dont la couleur varie du gris jaunâtre clair au brun verdâtre. La qualité la plus recher-

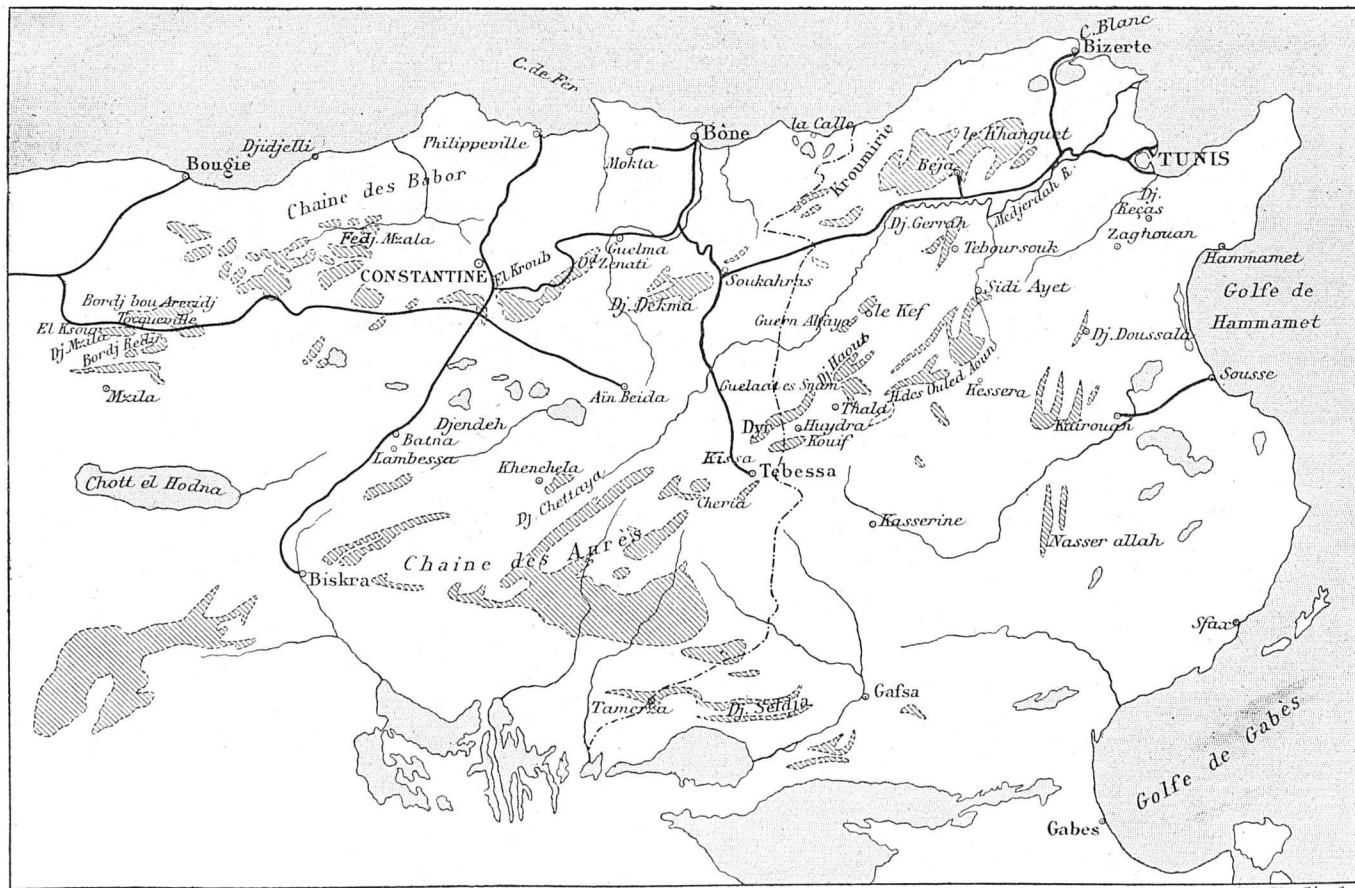


Fig. 103. — Carte des gisements phosphatés d'Algérie et Tunisie.
L'éocène phosphaté a été couvert de hachures (Echelle de 1/3 700 000).

Ed. Oberlin, Gr.

chée s'écrase facilement dans les doigts et sa densité ne dépasse pas 2, pour la roche en place. Son odeur organique est le plus souvent très caractéristique. Cette roche est formée par l'agglomération, dans un ciment calcaire plus ou moins abondant, d'une multitude de grains fins de toutes formes. Les uns arrondis, recouverts d'une patine brune et brillante, sont essentiellement constitués par du phosphate de chaux jaunâtre, à cassure terreuse ou d'apparence fibreuse; les autres, d'un vert d'herbe, à texture écailleuse ou en très petites masses d'apparence scoriacée ou corrodée, rappellent, par leur aspect, certaines glauconies. La roche contient de petits grains de quartz et de nombreux débris organiques¹.

Les conditions de dépôt étant (à la richesse près) très analogues dans la plupart des points, nous nous contenterons de décrire les gisements les plus importants et les plus typiques, renvoyant pour les autres, à notre étude antérieure (fig. 103).

Bordj-bou-Arréridj, etc. — Au Nord, la coupe de *Bordj-bou-Arréridj*, *Bordj Rédir* et *Tocqueville* est identique à celle que nous allons trouver à Tebessa : calcaires marneux blancs tendres avec trois bancs de phosphates intercalés entre des marnes noires gypseuses à la base et des calcaires durs au sommet.

Tébessa (Dyr, Kouif, etc.). — Dans la région de *Tébessa*, les exploitations ont porté, de 1894 à 1909, sur le plateau du *Dyr*, aujourd'hui abandonné; elles continuent sur les deux autres lambeaux suessonien du *Kouif* à l'Est, et d'*Ain Kissa* au S.-W. (fig. 104 et 105).

Le Djebel Dyr (altitude 1 200 à 1 500 m.) est un immense plateau de 45 à 50 km. de tour, couronné par des bancs calcaires qui dominent de 7 à 800 m. la plaine.

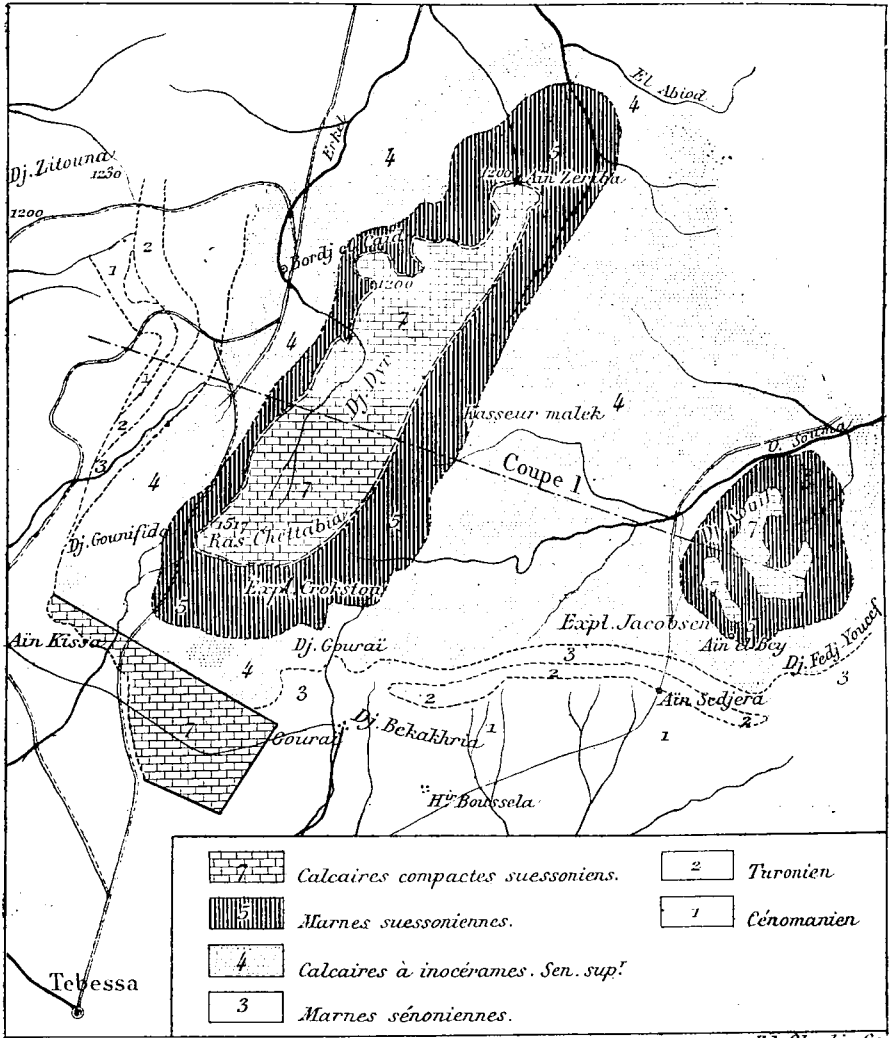
Le suessonien y repose en discordance, dans deux ondulations synclinales des calcaires à *inoceramus* sénoniens, dont les bancs supérieurs sont souvent corrodés (fig. 105).

Conformément à la coupe générale donnée plus haut², il comprend : à la base (A), des marnes noires, gypseuses, riches en fossiles, d'épaisseur très variable (120 m. au Dyr, 50 m. au Kouif); puis (B) les couches à phosphates (1,35 m.), alternant avec des calcaires blancs marneux à silex; et, au-dessus (C), des calcaires durs à nummulites (7); par exemple, dans l'exploitation Crokston, au Sud du Dyr :

7. Calcaires durs à nummulites, avec bancs compacts à rognons siliceux à la base	80 mètres.
6. Calcaire blanc tendre à silex, passant aux calcaires durs du dessus	3 à 4 mètres.
5. <i>Couche de phosphate de chaux</i>	0,50 m.
4. Calcaire blanc marneux à silex	2 à 3 mètres.
3. <i>Couche de phosphate de chaux</i>	0,60 m.
2. Calcaire blanc marneux à rognons de silex	4 à 5 mètres.
1. <i>Couche de phosphate de chaux</i>	3 —

¹ LEVAT. *Loc. cit.*

² Tome 1, page 685.



Ed. Oberlén, Gr.

Fig. 104. — Carte des phosphates du Dyr.

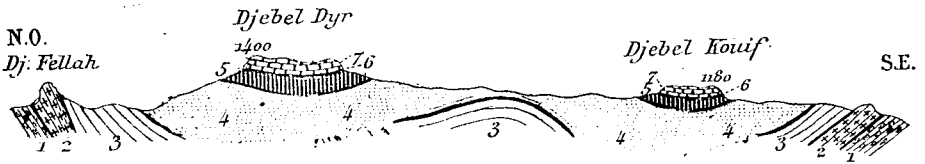


Fig. 105. — Coupe transversale NW-SE du Djebel-Dyr et du Djebel-Kouif, d'après Blayac. Longueurs au 1/200 000^e; hauteurs triplées.

Marnes noires gypseuses, renfermant à leur base, à Aïn-Kissa, une couche de 70 à 80 centimètres de phosphate de fer, avec nombreux cristaux de gypse et dents de squales.

La couche de phosphates 1, qui a 3 m. d'épaisseur et qui a donné lieu à l'importante exploitation Crokston, est particulièrement intéressante. Elle est d'aspect grisâtre grés-sableuse et, sur les 70 cm. supérieurs, se charge de silice en même temps qu'elle s'appauvrit; ce banc dur est ménagé comme toit des travaux. La teneur du reste de la couche va de 60 à 70 p. 100 de phosphate.

L'aspect de ce banc est tout à fait celui d'un dépôt littoral. On y voit des zones blanches et gréseuses, qui s'entre-croisent. En outre, les nombreux restes de poissons, de sauriens et de crustacés, qui s'y trouvent, semblent avoir été rejetés là par les vagues comme sur une plage.

Le banc phosphaté fait le tour du plateau, mais ne contient qu'une seule zone riche à 70 p. 100, qui existait, au Sud-Est, sur 200 m. de long (400 000 t. environ). Vers l'Ouest, on est descendu d'abord à 65 p. 100 et l'on arrive progressivement à 58. Dans tout le Nord, on n'a guère que 50 p. 100¹.

Le même banc phosphaté se retrouve, plus à l'Est, dans le *Djebel-Kouif* (exploitation Jacobsen, aujourd'hui l'Omnium), où les exploitations paraissent devoir être plus durables. Les phosphates atteignent là 4,50 m., dont les trois quarts exploitables, avec de fortes teneurs, qui, pour certaines parties tendres, montent à des chiffres très élevés; la teneur moyenne est d'environ 65 p. 100.

Enfin, à *Ain-Kissa*, le gisement, moins riche et plus tourmenté, contient une série de couches de 0,80 m. à 1,10 m. en nombre un peu variable (jusqu'à 6). Chaque banc a son toit formé par un banc de silix.

Kalaat-es-Senam, etc.². — La montagne très escarpée du *Kalaat-es-Senam*, ou *Guelaat-es-Snam* (Kalaat, château fort, falaise), forme un immense bloc calcaire rectangulaire, de plus de 50 m. de haut, posé au sommet d'une pyramide quadrangulaire.

Ce calcaire, étonnamment riche en nummulites, renferme quelques parties phosphatées. Il repose, comme dans la coupe du Dyr, sur des alternances de marnes noires avec bancs phosphatés, atteignant 10 m. d'épaisseur; mais, entre ces marnes et le calcaire nummulitique, s'intercale un calcaire blanc à gastropodes. Les travaux de l'Administration, en 1899, ont établi l'existence d'une couche de 1,60 m. à teneur de 60 p. 100, cubant 5 à 6 MT.

Gisements des environs de Gafsa (fig. 106 et 107). — Dans le Sud de la Tunisie et en bordure presque immédiate de la dépression des chotts, une longue bande Est-Ouest des terrains suessonniens avec phosphates s'étend, sur environ 60 km. de long, entre Gafsa et Tamerza³. Ici des mouvements, qui ont affecté l'éocène en même temps que le crétacé, ont disloqué et

¹ La compagnie de Dyr possède, en Tunisie, la concession du Kalaat-ès-Senam, sur laquelle elle a reporté ses travaux.

² Voir, pour les gisements phosphatés de Tunisie, les deux cartes (fig. 103, p. 687 et fig. 450). — Coll. Ec. d. M., 2822.

³ C. R. Soc. Géol., 3 février 1902, p. 2; voir plus haut, p. 210.

redressé parfois presque verticalement les couches phosphatées, marquées sur le sol par des lignes de dépression en raison de leur altérabilité plus facile par les agents atmosphériques. Ces couches phosphatées se distinguent généralement par leur couleur grisâtre ou brun verdâtre au milieu d'argiles brunes feuilletées. On a, pour les suivre, un bon jalon dans les bancs épais de calcaire à lumachelles ostréennes, qui les

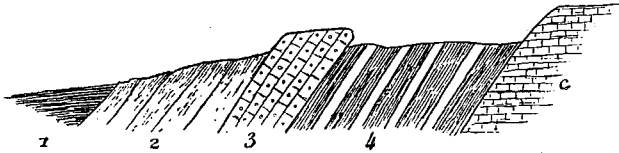


Fig. 106. — Coupe Nord-Sud sur la ligne Sud des affleurements de Gafsa, d'après D. Levat.

1, grès et sables miocènes. — 2, gypses stratifiés. — 3, calcaire coquillier. — 4, marnes et calcaires phosphatés. — c, crétacé.

recouvrent et qui se continuent eux-mêmes, plus au Sud, par une puissante assise de gypse blanc, en contact avec le miocène (fig. 106 et 107). Régulier et puissant sur le flanc Sud de l'anticlinal crétacé, le niveau phosphaté paraît, au contraire, très brisé et brouillé sur son flanc Nord. Sa puissance utile est d'environ 20 à 25 m. dans les exploitations actuelles. Elle diminue au fur et à mesure qu'on s'avance vers l'Est.

D'après une communication de Pervinière, dont il a déjà été question précédemment, ce niveau phosphaté de Gafsa serait un peu plus récent que celui de Tebessa et appartiendrait à l'éocène moyen au lieu de l'éocène inférieur; la transgression de l'éocène moyen, si marquée au Sud de Mactar, se serait étendue jusqu'à cette région Sud de la Tunisie, amenant cet éocène moyen à y reposer directement sur le crétacé.

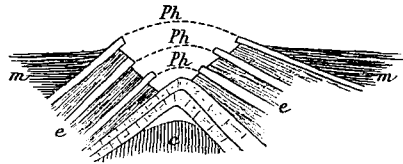


Fig. 107. — Coupe schématique à Gafsa, d'après D. Levat.

m, miocène. — e, argiles et phosphates (Ph) éocènes. — c, crétacé supérieur.

Quoi qu'il en soit, si nous revenons à la zone Sud qui constitue la partie la plus riche, elle présente, dans les exploitations actuelles, la coupe ci-jointe, comprenant quatre couches principales, dont deux seulement, les couches 1 et 2, sont utilisées.

COUPE DE LA ZONE PHOSPHATÉE A LA MINE DE METLAOUI (GAFSA)
(25 à 30 mètres) (de haut en bas).

Calcaire à lumachelles	1 mètre.
Phosphate, couche n° 0.	0,85 —
Conglomérats, phosphate, galets, cailloux.	1,25 —
Alternances de petits bancs calcaires et de marnes	2 —
Phosphate.	0,40 —
Conglomérats rouges.	0,90 —
Marnes.	0,60 —

<i>Phosphate, couche n° 1.</i>	{	Phosphate	2,40 m.
		Lit de petits galets très espacés	
		Phosphate	0,80 —
Coquilles et boulets.			0,02 —
<i>Phosphate.</i>			0,70 —
Gros galets.			
<i>Phosphate.</i>			0,90 —
Marnes.			0,15 —
Phosphate et galets.			0,15 —
Marnes.			0,25 —
<i>Phosphate, couche n° 2.</i>	{	Phosphate	1,10 —
		Galets	
		Phosphate	0,70 —
		Galets et phosphate	0,30 —
Marnes et alternances phosphatées			5 —
<i>Phosphate, couche n° 3.</i>			0,80 —
Marnes et petits bancs calcaires.			4,50 —
<i>Phosphate, couche n° 4.</i>	{	Phosphate	0,60 —
		Calcaires et marnes	0,60 —
		Phosphate	0,80 —
Calcaire à lumachelles			

Ces couches phosphatées sont grisâtres et grenues, à structure homogène. Dans une des petites couches secondaires on trouve, avec des quantités de dents de squales, des coprolithes atteignant parfois la grosseur d'une noix. Les restes de sauriens y sont fréquents et l'on a pu se demander si certains d'entre eux n'auraient pas été empruntés par la transgression marine à un sous-sol plus ancien. Les marnes, qui séparent ces couches, renferment également du phosphate, mais en proportions inutilisables. Il en est de même de la lumachelle d'huîtres supérieure, qui est elle-même souvent phosphatée. On peut remarquer les récurrences nombreuses de couches à galets qui accompagnent les phosphates.

La partie du gîte, sur laquelle porte l'exploitation, comprend quatre grands plateaux, ou tables, légèrement inclinés, séparés par des vallées, qui peuvent servir de voies d'accès. Ce sont, par ordre d'importance croissante : les tables du *Jaatcha*, du *Lousif*, la *table Ouest*, et enfin la table du *Métlaoui*, beaucoup plus étendue encore que toutes les autres et dont on applique souvent le nom à l'ensemble de la mine. On laisse ainsi de côté les dépôts trop inclinés du *Seldja*.

Pratiquement, la couche n° 1 donne une teneur en phosphate tricalcique de 59,5 à 60,5 p. 100. La couche n° 2, un peu plus riche, donne 62 à 63 p. 100. Le phosphate, extrait de ces deux couches, est mélangé et fournit un produit, dont la richesse moyenne est sensiblement de 60 p. 100.

L'analyse moyenne des phosphates de la couche 1 (séchés à 100°), est la suivante : phosphate de chaux, 60 ; carbonate de chaux, 13 ; sulfate de chaux, 7 ; oxyde de fer et alumine, 1,5 ; eau combinée, 2 ; matières organiques, 4 ; résidu insoluble dans les acides, 8 ; matières diverses (sels de potasse, de soude, de magnésie, etc.), 4,5.

Ces gisements ont été reliés au port de Sfax par une ligne de 250 km. construite spécialement à leur intention.

L'exploitation occupe environ 1 200 hommes. Elle a donné 950 000 t. en 1910.

Le phosphate extrait de la mine n'est soumis à aucun enrichissement ; mais il doit, comme les phosphates d'Algérie, subir, avant d'être expédié, un séchage préalable, afin d'être plus facilement broyé et tamisé dans les usines. Les fabricants de superphosphates, qui absorbent presque entièrement la production de Gafsa, exigent, en effet, une teneur maxima de 5 p. 100 d'eau.

Ce séchage, assez compliqué quand il s'agit de manipuler un millier de tonnes par jour, se fait, pendant l'été, à l'air libre.

En hiver, on opère dans des fours tournants et des fours à grille fixe. Une fois sec, le phosphate est mis en dépôt et exporté par trains de 250 t. à Sfax. Les phosphates sont exportés, soit en France, soit en Italie, Angleterre, Hollande, Allemagne, Japon, etc. Ils ont, pour l'industrie des superphosphates, l'avantage de renfermer peu de carbonate de chaux.

2° AUTRES PHOSPHATES TERTIAIRES

L'on a signalé le phosphate de chaux dans certaines argiles fossilifères de l'*éocène inférieur* (argile plastique d'Auteuil, *Fishbed* d'Ashley) ; dans le *Crag miocène* de Luton (Suffolk, Angleterre), où sa proportion atteint 50 et même 57 p. 100 ; dans les *Faluns miocènes* de la Gironde ; enfin dans le *Crag sarmatien* (52) du Cotentin¹. Dans tous ces gisements, la présence du phosphate de chaux est intimement liée à celle d'innombrables débris de coquilles, de polypiers, de dents et d'os fossiles, et ce n'est qu'exceptionnellement que l'on trouve de véritables concrétions phosphatées tertiaires, comme celles des *calcaires nummulitiques* d'Einsiedeln (Suisse).

F. — CONCENTRATIONS SUPERFICIELLES DE PHOSPHATE

(Caroline, Floride, Quercy, Nassau.)

Dans les gisements que nous avons étudiés jusqu'ici, sauf dans les sables phosphatés de la Somme et dans les filons d'enrichissement de la mer Morte, nous avons eu affaire à des dépôts sédimentaires ayant à peu près gardé leur allure primitive. En nous rapprochant maintenant de l'époque actuelle, nous allons voir s'accroître le rôle des concentrations superficielles à caractère continental, qui, anciennement, avaient dû se produire dans les époques antérieures, comme elles ont eu lieu pendant le tertiaire, mais qui, par un sort commun à tous les dépôts continentaux, nécessairement superficiels et soumis à une érosion facile, y ont généralement disparu.

Cette concentration superficielle du phosphate est, nous l'avons remarqué au commencement², un fait général. Le phosphate, déjà épars

¹ Coll. Ec. d. M., 1869 (Gourbesville). Les sables de Gourbesville, près Valognes, autrefois rattachés au pliocène (54), sont remarquables par l'abondance des côtes phosphatées d'*Halitherium*, empruntées par remaniement à un dépôt plus ancien.

² Page 648.

dans les terrains, ou contenu dans leurs détritiques organiques, tend à se dissoudre dans diverses réactions superficielles, notamment en présence de l'acide carbonique qui abonde toujours au voisinage de la surface ou encore dans les eaux salines et se reprécipite un peu après en nourrissant les concrétions phosphatées qui ont commencé à se former. C'est exactement le même phénomène qui se produit aussi pour le manganèse et qui aboutit ici à la formation de nodules phosphatés, comme ailleurs à celle des boules noires de pyrolusite disséminées dans tous les limons superficiels. Il est évident que le phénomène s'est accentué et a pris un développement particulièrement intense, là où il existait déjà une accumulation spéciale de phosphates ; mais cette accumulation n'était même pas nécessaire et il est très fréquent, lorsqu'on analyse des roches altérées, d'y trouver une accentuation de la teneur en phosphore. On a, par exemple, reconnu le fait pour les terres à ravets de la Guyane.

Dans des conditions plus spéciales, il s'est produit, à l'époque tertiaire (notamment en France pendant l'oligocène) et dans le Sud-Est des Etats-Unis, à une époque analogue, sur divers plateaux émergés, des altérations continentales, par lesquelles ont été détruits plus ou moins complètement des terrains ou des dépôts, dont il nous reste tout au plus des témoins, tandis que des substances diverses empruntées à leur dissolution venaient se concentrer dans les calcaires poreux du substratum, ou, faute de terrains poreux, dans les fentes plus ou moins élargies de ce même soubassement.

Ces gisements, où la remise en mouvement a produit des concentrations et des incrustations *per descensum* contraires au type ordinaire des filons proprement dits *per ascensum*, se présentent pour diverses substances antérieurement étudiées, telles que le fer, le manganèse, le baryum, le cobalt, etc. Ils sont particulièrement accentués pour le phosphate de chaux, en raison de sa solubilité facile en présence de l'acide carbonique qui abonde surtout en terrain calcaire.

Il en résulte toute une série de gisements présentant des caractères très divers suivant la nature des éléments remaniés, suivant l'entraînement à plus ou moins grande distance des solutions phosphatées, enfin, suivant la disposition des parois et des cavités où s'est opérée la concentration. Nous allons grouper ici ces gisements en trois catégories principales :

α) Formation de concentrations phosphatées sur des zones calcaires, déjà légèrement phosphatées : types Carolines, Floride, îles du Pacifique.

β) Remplissage de poches et abîmes creusés de préférence dans les terrains calcaires compacts, mais parfois aussi encaissés dans d'autres terrains (schistes, granites, basalte, etc.) : types Quercy, Tunisie, Estrémadure, Nassau.

γ) Concentration de phosphate sur le sol ou aux abords de grottes actuelles par décomposition directe de matières organiques : types grottes de l'Hérault et d'Algérie ; gisements de guano équatoriaux.

Le premier est, de beaucoup, celui qui donne les gisements les plus étendus. Il paraît s'être de préférence réalisé quand les calcaires et craies phosphatées d'origine marine étaient assez poreux pour recevoir une

concentration homogène dans toute leur masse. Parfois il a été suivi d'une transgression marine qui, en remaniant les débris du substratum, y a opéré une nouvelle concentration mécanique.

1° CAROLINE DU SUD (remaniement de phosphates oligocènes) ¹

Les gisements phosphatés de la Caroline du Sud ont eu une importance considérable dans l'industrie des phosphates. Exploités depuis 1867 (Charleston min. and man. Co), et fournissant couramment du 58/63 p. 100 de phosphate de chaux, ils ont longtemps servi de régulateurs au marché: leur teneur moyenne de 60 p. 100 étant prise comme point de départ de l'échelle de la valeur commerciale des phosphates. Leur production atteignait déjà 200 000 t. vers 1880. Elle s'est tenue au-dessus de 550 000 t. de 1889 à 1893, jusqu'au développement de la Floride et de l'Afrique du Nord. Aujourd'hui elle est redescendue entre 250 et 300 000 t.

Ces gisements, comme ceux de la Floride, dont il sera question plus loin, et peut-être aussi comme ceux du Pacifique, étudiés dans un autre paragraphe, semblent résulter d'une concentration phosphatée superficielle encore en voie de continuation, qui s'est opérée sur des calcaires et marnes oligocènes à teneur assez faible en phosphate et sur des ossements empruntés à des terrains d'âges divers.

Si l'on remonte au gîte primitif, on trouve, comme point de départ, les calcaires de Vicksbourg, dont l'assise, à peu près continue sur la côte Est de l'Atlantique, est déjà sensiblement phosphatée. Ces calcaires, autrefois considérés comme éocènes, aujourd'hui rattachés à l'oligocène inférieur, sont, vers la Floride, recouverts en concordance par l'oligocène supérieur et le miocène, contenant eux aussi des bancs phosphatés.

La coupe ordinaire des gisements est la suivante. Généralement, on rencontre sous la terre végétale: une argile sableuse et micacée; puis une marne argileuse bleue avec beaucoup de coquilles récentes; un peu de sable grossier, et, à moins de 2 m. de profondeur, un lit de nodules dans une marne plus ou moins siliceuse. Au-dessous vient encore un calcaire (appelé marne dans le pays) très phosphaté dans sa partie supérieure et s'appauvrissant en profondeur jusqu'à 8 ou 10 p. 100 de phosphate.

Il semble bien que le phosphate de la partie haute résulte d'une concentration continentale opérée sur un calcaire à faible teneur, comme celui de la partie basse et suivie d'une transgression avec remaniement donnant le lit de nodules. Les nodules, qui paraissent de véritables galets ou fragments roulés ayant subi une concentration progressive en phosphate, atteignent parfois le poids d'une tonne. L'épaisseur de ce lit de nodules peut atteindre un mètre. On exploite depuis 0,20 m.; il rend de 700 à

¹ Coll. Ecole des Mines. 1618. — 1890. HOLMES (As. f. Adv. of Sc.). — 1873. BRYLINSKI. *Rapport sur les phosphates de chaux de la Caroline du Sud* (Soc. géol. de Normandie, t. 2). — 1876. LEIDY (American journal, 3^e, t. 12, p. 232; Rev. de géol., t. 10, p. 47 et t. 11, 42; cf. Ann. d. Mines, 7^e, t. 13, p. 32-7). — 1878. (Rev. de géol.; Ann. d. Min., 7^e, t. 13, p. 352; cf. t. 10, p. 47 et t. 11, p. 42). — 1891. WYATT. *Phosphates of America*, p. 45. — 1895. LEVAT. *Etude sur l'industrie des phosphates* (Ann. d. M., 9^e, t. 7, p. 83 à 90). — 1904. LUCIUS P. BROWN. *Phosphate deposits in the Southern States* (Proc. Eng. Ass. of the South., t. 15). — 1907. *Mineral Industry*, p. 773.

2 500 t. de phosphate par hectare suivant le rapprochement des nodules dans leur gangue : en moyenne 1 500 à 1 600.

Les ossements sont très abondants dans ce gisement. On aurait pu leur attribuer directement sa formation ; ils semblent, au contraire, avoir subi eux-mêmes la phosphatisation. Ces ossements appartiennent aux périodes géologiques les plus diverses depuis les ossements oligocènes jusqu'à des os de porc et de bétail contemporains qui, dans les produits de remaniement récents des rivières, ont été eux aussi phosphatisés.

Pratiquement, on a distingué, comme nous allons le voir aussi en Floride, les phosphates de terre et ceux de rivière (land et river pebbles). Ces derniers sont simplement des phosphates de terre remaniés et concentrés dans les cours d'eaux. Cette dernière forme, qui était d'une extraction très facile, est aujourd'hui épuisée.

Les nodules phosphatés tiennent, en moyenne, 60 p. 100 de phosphate de chaux (27,30 d'acide phosphorique avec 4,30 de matières organiques).

2° FLORIDE (Concentration et remaniement de phosphates oligocènes et miocènes).

Les phosphates de la Floride, exploités seulement depuis 1890, ont amené, en 1891, sur le marché des phosphates, une baisse qui n'a pas été de moins de 30 p. 100.

Ils sont groupés principalement autour de deux points : dans le Nord (environ sur le 29° degré de latitude), aux environs d'Ocala ; au Sud (entre le 26° et le 27° degré), dans les vallées des diverses rivières qui aboutissent à la baie de Charlotte Harbour, sur le golfe du Mexique, en particulier du Peace River, au Sud de Bartow (fig. 108).

Par leur allure géologique, aussi bien que par leur situation géographique, ils se rapprochent des gisements de la Caroline du Sud (Charleston) que nous venons de décrire.

C'est en 1884 qu'un ingénieur français, Le Baron, eut, le premier, l'honneur de reconnaître ces gisements nouveaux ; mais ce n'est guère qu'en 1889 qu'on se mit à les exploiter sérieusement. En 1892, la production était déjà de 200 000 t.

En 1908, les sorties par les ports ont atteint 1 550 000 t. et, d'année en année, on assiste encore à des accroissements de 250 000 à 300 000 t., qui prouvent la richesse du gisement, évalué en 1893 par le Geological Survey

' Coll. Ec. d. M., 1296. — SMITH, LAURENCE et C. JOHNSON. *Phosphatic rocks of Florida* (Science, t. 5, p. 395. Cambridge, Mass., U. S.). — AGASSIZ. *Report on the Florida reefs*. — 1881. E. SMITH. *On the geol. of Florida* (in-8° avec carte). Am. J. Sc., 3^e, t. 21, p. 292-309. — 1888. PENROSE. *The nature and origin of deposits of phosphate of lime*. p. 78. (Bull. of the Un. States Washington). — 1891. WYATT. *The Phosphates of America*, p. 93 (1 vol. New-York; 27, Park Place). — 1891. WATTEYNE. (Ann. Trav. Publ. de Belgique, t. 49). — 1891. D^r KELLER (Chemische Zeitung). — 1892. LADUREAU (La Nature, 9 avr.). — 1892. L. DE LAUNAY. *Nouveaux gisements de phosphate de chaux en Floride* (Nouvelles géographiques, juin, Hachette). — 1889-90. *Mineral resources*, p. 451. — 1892. ELDRIDGE. *Phosphates of Florida*. — 1893. *Stat. de l'Engin.*, p. 370. — 1893. COX (C. R. Z. f. pr. G., p. 166). — 1895. LEVAT. *loc. cit.*, p. 90 à 126. — 1896. WATTEYNE. *Phosphates de la Floride* (Rev. un., p. 306-328) (C. R. Z. f. pr. G., 272). — 1908. LEMAIRE (Génie civil, 22 nov.). — 1909. C. A. STONE (Engin. and min. Journ., p. 454).

entre 120 et 290 millions de tonnes. 12 compagnies principales, syndiquées entre elles, fournissent le phosphate sous deux formes : hardrock ou phosphate en roche à 77/82 et pebbles ou nodules à 68/72. Ce sont ces derniers surtout dont la production s'accroît.

On les divise à leur tour, comme en Caroline, en nodules de terre et en nodules de rivières.

La Floride, où se trouvent ces gisements si considérables, est une pres-

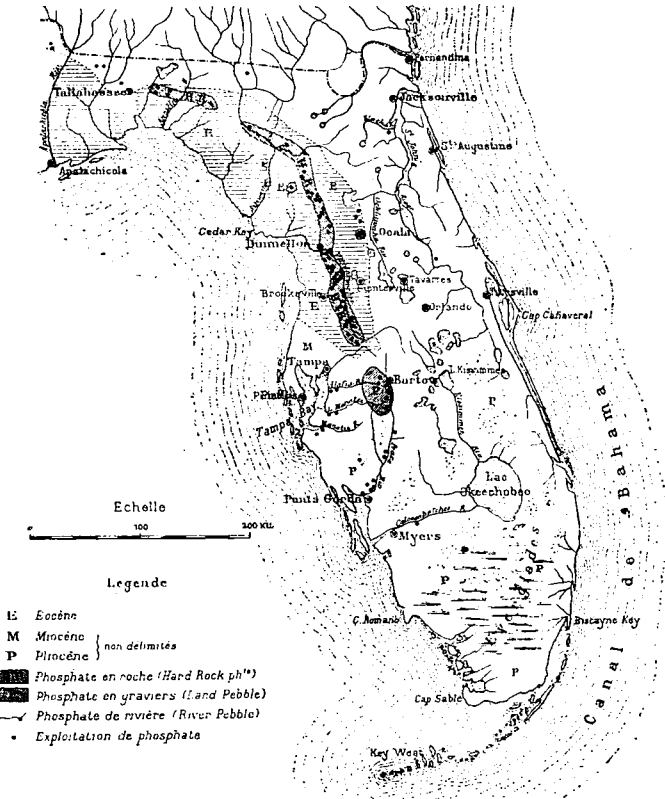


Fig. 108. — Carte des gisements phosphatés de la Floride, d'après D. Levat.

qu'île de 600 km. de long sur 180 km. de large, couverte de savanes immergées, de larges étangs et d'épaisses forêts avec une ceinture de récifs coralliens. Les pénétrations et circulations souterraines des eaux au milieu de calcaires fissurés y sont fréquentes et ont dû, comme nous allons le voir¹, contribuer à la concentration des phosphates. Ceux-ci, sous leur forme actuelle, occupent surtout (fig. 108) une longue zone

¹ On peut comparer ce fait avec ce que nous dirons plus loin des îles océaniques et avec ce qui a dû se passer anciennement dans le cas des phosphorites du Quercy. Les phosphates deviennent ainsi un cas particulier des formations stalagmitiques, dans lesquelles domine ailleurs d'habitude, presque exclusivement, le carbonate de chaux.

N.-S. à l'Ouest d'Ocala (Hard rock) et une autre plus méridionale à Bartow.

Géologiquement, ce pays comprend une série concordante de calcaires appartenant à l'oligocène et au miocène. A la base de l'oligocène se trouve, à l'Ouest d'Ocala, la formation de Vicksbourg, déjà signalée à propos de la Caroline. Cette formation est composée de calcaires légèrement phosphatés, à travers lesquels se fait surtout la circulation intense des rivières souterraines. Son épaisseur atteint jusqu'à 150 m.

Puis viennent, dans le Nord et l'Ouest de l'Etat, de minces couches horizontales de calcaires également phosphatés, qui appartiennent au miocène. Leur altitude moyenne ne dépasse pas 25 m. au-dessus de la mer ; et la zone où on les observe est, par suite, marécageuse. Ces deux étages ont donné lieu à des concentrations locales de phosphates, qui forment ce qu'on appelle le *hard rock*, décrit plus loin.

Au-dessus vient une série pliocène de sables, graviers et argiles paraissant marquer un retour des eaux après une période d'émersion. A la base de cette série régressive, on a une couche à nodules (*pebble rock*), qui fournit une part croissante de phosphate. La puissance de cette formation peut atteindre 10 m. et la proportion des nodules phosphatés s'y élève jusqu'à 40 p. 100.

Enfin, comme dans la Caroline, un remaniement par les cours d'eau actuels a repris ces land pebbles pour donner des nodules de rivières, ou *river pebbles*.

a) Phosphate en roche (Hard rock). — Les dépôts du Hard rock dans l'éocène sont concentrés dans une bande étroite d'environ 230 km. de long, située à 40 ou 80 km. de la côte Ouest et parallèle à elle. L'aspect est celui d'un conglomérat torrentiel, dans lequel des fragments de calcaire phosphaté à haute teneur (*boulders*) sont empâtés par une gangue de sable phosphaté plus tendre et mêlée d'argile, due sans doute à la destruction des boulders (*soft phosphate*). Les boulders à 75/80 p. 100 de phosphate tricalcique sont généralement blancs avec des cassures très diverses témoignant de décompositions plus ou moins avancées ; leur volume atteint jusqu'à 3 m³. Le « soft phosphate » est très irrégulièrement mélangé avec de l'argile colorée et du sable, le tout imprégné de ciment phosphaté et recouvert par du sable plus pauvre. Cet ensemble, qui accuse bien un terrain de transport, remplit, par endroits, des poches atteignant 20 m. de profondeur. Le soft phosphate est à haute teneur (80 p. 100 de phosphate et 96,5 d'acide phosphorique), mais mélangé d'argile qu'il est assez difficile d'en séparer par lavage.

En rapport avec les parties phosphatées du miocène, on trouve également du hard rock, localisé dans les savanes noyées, à peu de profondeur, sous les sables superficiels. Ce phosphate se distingue par l'absence de soft phosphate. Son épaisseur ne dépasse guère 1,50 m.

b) Nodules de terre (Land pebbles). — Ces rognons, qui contribuent de plus en plus à l'extraction de la Floride, sont, en général, de la grosseur d'une noix et tiennent 32 p. 100 d'acide phosphorique. Leur couleur originale est blanche, comme celle du phosphate en roche ; mais ils noircis-

sent vite à l'air. Leur surface est lisse et lustrée. Ils sont formés parfois d'une matière jaune brun rappelant certaines variétés de hard rock et il est possible que le remaniement du hard rock au moment de la transgression même ait contribué à les former.

c) **Nodules de rivière (River pebbles).** — Ces nodules, empruntés pour la plus grande part aux gisements précédents, se rencontrent dans le lit majeur des rivières. Quelquefois ils sont formés de débris roulés du hard-rock traversé ; mais leur formation s'est continuée jusqu'à nos jours ; car, sur la Caloosatratchee River, des coquilles pléistocènes phosphatisées y abondent avec des coquilles pliocènes. La région où on les a le mieux étudiés est la Peace River, où ils forment de véritables bancs à nodules bleus, noirs, ou brun foncé sur leur surface extérieure, jaune brunâtre dans leur cassure.

On peut, en résumé, admettre qu'il y a eu là des bancs de calcaire poreux, déjà phosphatés par eux-mêmes, appartenant à l'oligocène et au miocène et que ces bancs ont été l'objet, d'abord d'une concentration sur place par circulation des eaux, puis, à diverses époques, d'une destruction et d'un remaniement dans des mouvements d'eau, pendant lesquels la dissolution et la concentration du phosphate ont dû se poursuivre. L'action de la mer, dans ces déplacements, est prouvée par la présence fréquente de dents de squales et autres animaux marins qu'on trouve intacts et non roulés à côté de nodules arrondis.

Exploitation. — Le hard rock est extrait, soit par des excavateurs, soit à la main, puis débourbé, lavé et séché. Les land pebbles sont exploités, soit par dragues, soit quelquefois par une méthode hydraulique. Les phosphates de rivières sont exploités au moyen de pompes centrifuges suceuses montées sur des pontons dragueurs.

Les exportations se font par Fernandina, Tampa Bay et Puna Gorda. Le prix de revient des nodules est d'environ 14 fr. sur wagon.

3° PHOSPHATES DES ILES OCÉANIQUES

On a, depuis quelques années, commencé à exploiter, sur diverses îles de l'Océan Pacifique, des gisements phosphatés remarquables par leur haute teneur à 80 p. 100, qui les rapproche des hard rocks de la Floride examinés plus haut et dont l'origine pourrait bien être analogue. Ces gisements, qui ont dû, en 1911, produire environ 450 000 t., pourraient, si le marché s'y prêtait, augmenter assez aisément leur production. Bien que chacun d'eux soit limité, leur nombre doit être assez grand. Le prix de vente élevé d'environ 70 fr., qu'atteignent leurs produits, peut, malgré un fret de 35 à 40 fr. pour l'Europe, leur permettre d'y accéder dans une certaine mesure et leur ouvre tout au moins le marché du Japon et de

¹ Coll. Ec. d. M., 1871 (Navassa) ; 1871 (Redonda) ; 1868 (Curaçao). — 1879. L. MEYX. *Das Phosphorit Lager von Curaçao* (Zeits. der D. geolog. Gesellschaft, t. 31, p. 697). — 1879-80. S. KNEELAND. *The mineralised phosphatic guanos of the equatorial Pacific Islands* (Proc. of the American Ac. of Arts of Boston, t. 20, p. 235). — 1909. L. DE LAUNAY. *Les phosphates des îles océaniques* (La Nature, 20 fév.).

l'Australie, où la consommation, nulle il y a quelques années, est en voie d'accroissement très rapide.

Les conditions où se présentent les îles à phosphates sont, d'après ce qu'on sait jusqu'ici, les suivantes :

1° Situation à moins de 20 degrés de part et d'autre de l'équateur ;
 2° existence d'une île véritable, surélevée de 30 à 50 m. au moins au-dessus de l'Océan et non d'un simple atoll comme il y en a tant dans ces parages, où le phosphate, s'il existe (et c'est le cas de Clipperton), ne saurait former un cube sérieux ;
 3° enfin, île non volcanique, mais corallienne.

Les îles où l'exploitation a, dès à présent, commencé, présentent ce caractère commun de former de véritables saillies au-dessus de l'Océan : saillies de 5 à 10 km. de plus grande longueur, atteignant 100 m. à Makatea et constituées par un calcaire, en partie seulement corallien et surtout formé de débris organisés calcaires, comme on en trouve dans les îles Salomon, auquel un explorateur récent, Agassiz, a attribué un âge pliocène. Si la détermination d'âge manque de précision, tout au moins est-il certain que, depuis la construction de ces récifs coralliens, il s'est écoulé un temps considérable et produit un de ces mouvements du fond océanique, auxquels on avait d'abord recouru avec tant de complaisance (en les imaginant de sens inverse) dans la théorie de Darwin et Dana, auxquels on a aujourd'hui renoncé pour expliquer le phénomène de la construction corallienne et qui, néanmoins, sont incontestables (avec zones d'affaissement et zones de surélévation) dans cet immense territoire volcanique recouvert par l'océan Pacifique. A Makatea, on constate même, par les traces de sous-caves que la mer a laissées à trois niveaux dans les falaises, trois étapes successives de ce surélévement¹. C'est sur la partie supérieure de ces îlots coralliens formant un plateau couvert de brousse, au milieu du calcaire corallien ancien à structure compacte, que les phosphates en sables et nodules occupent des dépressions plus ou moins étendues, bordées de calcaire stérile, entrecoupées même de récifs stériles que les Anglais ont appelés des « pinacles », avec une épaisseur très irrégulière, pouvant atteindre en moyenne 1,50 à 2 m. Les îles à phosphates, tranchées sur la mer par des falaises, montrent, dans l'intérieur, de nombreuses cassures ou diaclases, dans lesquelles se fait une circulation active des eaux, qui vont ressortir à la base des escarpements² après s'être chargées de sels minéraux au point d'en être imbuables. Enfin, les sables et nodules phosphatés ont, nous l'avons dit, une teneur moyenne commerciale de 80 p. 100, qui les rapproche des sables phosphatés de la Somme, avec moins de 1 p. 100 d'oxyde de fer et d'alumine. Leur cube est estimé à 2 ou 3 millions de tonnes, à *Angaur*, peut-être une quinzaine à *Océan*, à 7 ou 8 à *Makatea*.

Si l'on cherche l'origine de ces dépôts, il paraît évident qu'une remise en mouvement, analogue à celle que nous avons admise dans les gites étudiés plus haut de la Floride, a déterminé un enrichissement local d'un

¹ Dans les îles Salomon, des placages coralliens, répartis en paliers sur un noyau de roches volcaniques, montrent des étapes analogues.

² On connaît les cavernes des îles coralliennes (Barmudes, etc.), intéressantes à rapprocher de ce que nous venons de voir en Floride.

ancien gisement plus pauvre, soumis à cette circulation des eaux qui apparaît aujourd'hui si active. Des calcaires poreux coralliens se sont ainsi, sur certains points, enrichis progressivement en phosphate par la base, tandis que se corrodait et se dissolvait leur partie haute. A cet égard, l'étude de ces gisements océaniques est particulièrement intéressante parce qu'elle nous montre, pour ainsi dire, en action des phénomènes d'enrichissement, ailleurs plus anciens. Maintenant, quel est ce gisement ancien? Est-ce simplement le calcaire corallien ordinaire, qui renferme en moyenne 0,25 à 0,80 p. 100 de phosphate, et qui, plus haut, dans ses parties dissoutes, pouvait être plus riche. Ce serait alors un exemple de craie phosphatée marine, émergée à la suite d'un mouvement tectonique et soumise, par suite de cette émergence qui a dû être un cas fréquemment renouvelé dans les sédimentations marines, à une forte altération superficielle. On peut cependant se demander s'il n'y aurait pas eu, en outre, une première cause d'enrichissement local, qu'on chercherait dans un ancien dépôt de guano analogue à ceux qui existent encore sur la côte du Pérou aux îles Chinchas ou sur les îles équatoriales, ou encore dans une accumulation d'organismes à l'intérieur d'un atoll ultérieurement surélevé. Le phosphate, ainsi déposé d'abord à la surface du récif, aurait plus tard, par une dissolution qui pourrait remonter à une période géologique déjà ancienne, pénétré dans le calcaire de manière à le rendre phosphaté, comme cela se produit au-dessous des dépôts de guano (îles Jarvis, Howland, etc.) et dans le sol des cavernes. Et, dans la suite, les circulations d'eau, agissant de nouveau sur le calcaire phosphaté, en auraient tiré les sables par dissolution du carbonate.

Un phénomène identique s'est parfois produit sur la ceinture corallienne surélevée de certains atolls (Clipperton, etc.), avec même production de phosphates à haute teneur, mais sur une bande de rocher très étroite.

Parmi les îles océaniques où ce phénomène s'est réalisé, on en cite jusqu'ici 5 de quelque importance.

1° L'île *Christmas*, île anglaise, au Sud de Java, par 11° latitude Sud et 106° longitude Est Green., a été exploitée la première par une compagnie anglaise, à partir de 1900, et son exportation a atteint, en 1911, 153 000 t. Cette île a un diamètre de 40 km. Les premiers travaux de 1900, consistant en 42 sondages, ont permis de reconnaître 620 000 t. de phosphates disponibles à 60-90 p. 100 et l'on estime le cube total à peu près au double. Il existe, en outre, des quantités notables de phosphate d'aluminium.

2° *Angaur*, île allemande du groupe des Palau, est à l'Est des Philippines, par 7° 10 de latitude Nord et 134° de longitude Est. Pour son exploitation, il s'est constitué, en 1908, une société allemande, la « Deutsche Sudsee Phosphat Actien Gesellschaft », au capital de 5 625 000 marks, avec concession de trente-cinq ans, à la fois pour cette île et pour l'île voisine de Pililju. La production a été, en 1911, de 41 000 t.

3° et 4° L'île anglaise *Ocean* (Baraba) et l'île allemande *Naurou* (Pleasant), entre les îles Marshall et les Salomon, presque sur l'Equateur, vers le 166°, sont exploitées, depuis 1902, par une société anglaise, The Pacific Phosphate Co, avec production actuelle de 250 000 t. (1911). Cette société anglaise, succédant à une société allemande qui venait d'échouer, a, jusqu'ici, brillamment réussi.

5° *Makatea* (17° latitude Sud et 148° longitude Ouest), île française du groupe de la Société à 250 km. N.-E. de Tahiti, commence à être exploitée par la Compagnie française des phosphates de l'Océanie. On n'a encore produit que 12 000 t. en 1911; mais on espère atteindre 200 000 t. par an.

En dehors de ces îles, on a signalé, en quelques autres points, notamment dans l'îlot de *Clipperton* au Sud du Mexique (par 10° de latitude Sud et 110° de longitude Ouest), quelques couches de médiocre importance¹. Maintenant que l'attention est attirée sur cette recherche, il est bien probable que l'on trouvera d'autres îles à phosphates dans cette poussière d'îlots, souvent sans nom, presque inconnus et déserts, qui sèment l'immense étendue de l'océan Pacifique.

4° PHOSPHORITES DU QUERCY*

Le type extérieur des phosphorites du Quercy est, au premier abord, totalement différent de celui que nous avons généralement rencontré dans les gites précédents. Au lieu de couches ou de lits à nodules, nous avons ici des poches verticales, ou des sortes de filons remplis de phosphorite concrétionnée. L'origine nous paraît être cependant la même : dissolution et concentration de terrains faiblement phosphatés, avec cette différence que les solutions phosphatées, au lieu de rencontrer ici, dans le substratum, des terrains poreux et de s'y éparpiller, ont trouvé des terrains plus compacts à diaclases élargies en grottes, abîmes, avens, etc., dans lesquelles elles se sont localisées.

On pourrait également, au lieu de terrains faiblement phosphatés, penser à la décomposition directe de matières organiques accumulées, comme

¹ On cite les îles Purdy, l'île Mole où l'on a fait un essai malheureux dès 1890, etc. Des phosphates du même genre ont été autrefois signalés à l'Ouest et au Sud d'Haiti dans la mer des Caraïbes : à Navassa (par 75° de long. et 18°30' de lat. N.), à Alla vela (par 72° de long. et 18° de lat. N.), ou, plus à l'Est, dans la même mer, sur l'îlot de Redonda, au N.-W. de la Guadeloupe (Coll. Ecole des Mines, 1868, 1870, 1871).

* Coll. Ecole des Mines. 1854. — 1871. DAUBRÉE. *Phosphorites du Quercy* (C. R., t. 78, p. 1030). — 1872. GERVAIS. *Sur les gisements de mammifères observés dans les phosphates de Tarn-et-Garonne et du Lot* (B. S. G. F., 2^e, t. 29, p. 392). — 1872. DELFORTRIE. *Les gîtes de chaux phosphatée dans le département du Lot* (Ann. Soc. linn. de Bordeaux, t. 28, p. 505. Bordeaux). — 1873. COMBES. *Note sur l'origine et la formation des minerais de fer du Haut-Agenais* (Lot-et-Garonne) et du phosphate de chaux du Quercy (Lot) (In-8°). — 1873. PÉRON. *Sur quelques points de la géologie de Tarn-et-Garonne* (B. S. G. F., 3^e série, t. 2, p. 85-120). — 1874-76. F.-W. RUDLER. *Notes on specimens of phosphorites from the department of the Lot, France* (Proc. of the geol. As., t. 4, p. 164). — 1874. BAUDRIMONT. *Sur les phosphates du Lot* (Soc. d'agric., 3^e série, t. 9). — 1875. DAUBRÉE. *Phosphorites du Quercy* (B. S. G. F., 3^e série, t. 3, p. 399). — 1875. REV LESCUR. *Sur les phosphatières du Tarn-et-Garonne* (B. S. G. F., 3^e, t. 2, p. 398). — 1877. FILHOL. *Phosphorites du Quercy* (Ann. des Sc. géol., t. 8). — 1885. DIEULAFAIT. *Sur l'origine des phosphates de chaux en amas* (Ann. Ch. et Phys, 6^e série, cf. C. R. 1884, p. 261). — 1887. DOUVILLÉ. *Statistique de l'industrie minérale en France*, p. 257, etc. — 1895. NICOLAS et DEPÉRET. *Phosphates de la Capelle, près Avignon* (C. R., 14 janv., t. 5, p. 204-240). — 1891. VASSEUR. *Terrains tertiaires du Sud-Ouest de la France* (B. Carte G. F., n° 19, p. 15). — 1903. THÉVENIN. *Etude géologique de la bordure S.-W. du massif central* (B. Carte G. F., t. 14, 202 p.). — 1908. GAILLARD. *Les oiseaux des phosphorites du Quercy* (Ann. Un. Lyon, fasc. 23). — 1909. HARLÉ et STEHLIN. *Une nouvelle faune de mammifères des phosphorites du Quercy* (B. S. G. F., 4^e, t. 9, p. 39 à 53). — 1910. VAN DEN BROECK, E. A. MARTEL et RAHIR. *Cavernes de Belgique*, t. 1, p. 258 à 286, et p. 309 à 313.

les guanos et les charniers d'animaux; mais cette origine des phosphates, qui sera étudiée en finissant, nous paraît, somme toute, n'être intervenue que dans des cas très localisés.

Historique et situation géographique. — Le type le plus important des gîtes de phosphate en poches ou en amas se trouve dans la région qui est désignée sous le nom de Quercy et qui est située aux confins des départements du Lot, du Tarn-et-Garonne et du Lot-et-Garonne et principalement dans le voisinage des deux petites villes de Caylus et de Saint-Antonin.

Le phosphate de chaux y a été découvert en 1869, près de la ferme de Pendaré, dans le Tarn-et-Garonne, par Poumarède. Le minéral, jusqu'alors méconnu, se trouvait en blocs épars à la surface des champs et avait servi, confondu avec les matériaux calcaires, à construire les murs et les maisons du voisinage.

Dès que la valeur de la nouvelle roche fut connue, les recherches se multiplièrent au voisinage et firent trouver des gîtes analogues sur une surface de près de 2 000 km². L'exploitation n'a eu qu'une durée précaire.

Allure des gîtes. — Le sol du Quercy est constitué par des calcaires compacts et quelquefois spathisés appartenant à l'étage oxfordien et à celui de l'oolithe bathonienne, accidentellement surmontés par quelques lambeaux de tertiaire lacustre. Ces terrains forment de grands plateaux appelés *causses*, dans lesquels le phosphate se rencontre en vastes poches ou en longues veines ayant des directions en rapport avec les systèmes de cassures du terrain, comme cela se reproduit pour les vides analogues restés béants dans la même région sous le nom de gouffres, avens, etc., ou pour ceux qui ont été remplis par du minerai de fer sidérolithique¹. Ces poches sont toujours limitées dans la profondeur, ou du moins ne se continuent, à la manière des grottes, que par des systèmes compliqués de fissures horizontales.

Le phosphate remplit donc de véritables grottes, qui plongent verticalement dans le sol et parfois aboutissent au jour, comme les grottes actuelles, par deux orifices: tantôt de simples boyaux, où un homme aurait peine à descendre; tantôt de larges entonnoirs ayant jusqu'à 60 m. de diamètre; ou d'immenses crevasses à parois verticales, qui se sont prolongées, comme aux carrières des environs de *Carjac*, sur 600 m. en direction et 40 m. de large et ont atteint, à *Saint-Jean-de-Laur* par exemple, des profondeurs de 110 m.

Certains gisements, tels que celui de *Pendaré*, affectent l'apparence de véritables filons, à parois verticales² grossièrement parallèles et se poursuivant sur plusieurs centaines de mètres avec 2 ou 3 m. de puissance. Mais, quelquefois aussi, comme à *Lamandine*, on voit le phosphate courir

¹ On nous permettra de rappeler que, dès 1891, nous avons insisté sur ce rapprochement avec les grottes actuelles (*Gîtes minéraux*, p. 349 et 353), malgré quelques réserves nécessitées par l'opinion tout à fait opposée de Fuchs, dont nous utilisons les notes.

² C'est un point que nous aurons à retenir en étudiant bientôt les filons de phosphate espagnols. On peut comparer, comme vide actuellement béant dans la même région et présentant également l'aspect d'une longue fracture verticale, la galerie souterraine, aujourd'hui bien connue, de Padirac.

en tous sens à travers le calcaire, sous forme de veines de quelques centimètres remplies de phosphate de chaux absolument pur. Il arrive aussi que le phosphate ait rempli les vides laissés par la décomposition des organismes enfouis en opérant un véritable moulage.

Quelles que soient leurs formes, les parois de ces excavations portent toutes des traces de corrosion manifestes : les protubérances de leurs surfaces sont toujours à contours arrondis ; on n'y observe jamais de roche saillante à arêtes vives, et, si l'on examine de près la roche calcaire, on la trouve recouverte d'une croûte pulvérulente de calcaire argileux, sous laquelle la roche se montre plus ou moins corrodée. Tous les caractères sont ceux des cavités creusées par les eaux superficielles à la façon des grottes à stalactites.

La distribution des matières de remplissage s'est faite dans ces gisements avec un certain ordre que les travaux d'exploitation ont bien mis en évidence et qui est contraire à l'idée d'une substitution progressivement étendue du phosphate au calcaire. C'est toujours contre les parois calcaires que se trouvent les phosphates concrétionnés à haute teneur, le centre du dépôt étant occupé par des terres argileuses à phosphates assimilables aux terres calaminaires, dans lesquelles on trouve le phosphate en tubercules ou rognons souvent très volumineux, isolés au milieu des argiles et sous forme de grains constituant, au milieu des terres, un véritable sable phosphaté.

Enfin, l'on doit signaler un gisement spécial, découvert à *Bozouls* (Aveyron), où la roche phosphatée se rencontre, non plus dans le calcaire, mais dans un basalte à structure sphéroïdale, plus ou moins altéré et dans les tufs et conglomérats éruptifs qui en dépendent. Le phosphate, ici, ne forme pas de dépôts continus : il s'isole en rognons, quelquefois très gros, à structure concrétionnée, avec des ramifications saillantes et très déliées, divergeant en tous sens à travers la masse du tuf éruptif. Ces blocs phosphatés empâtent très souvent des débris de tufs basaltiques.

Aspect du minerai. — Si nous passons maintenant à la composition même du remplissage, nous trouvons le plus souvent le phosphate comme une roche grise ou blanc mat, mêlée de parties colorées par de l'oxyde de fer, ne montrant pas les lamelles cristallines des calcaires et affectant une structure concrétionnée des plus caractéristiques.

Quelquefois le phosphate prend une apparence compacte, esquilleuse dans sa cassure, mamelonnée à sa surface, d'un éclat comparable à celui de certains silex, mais se rayant facilement sous l'acier et accusant toujours, par les zones alternatives qui s'y dessinent, sa formation par voie de dépôts successifs. Cette variété compacte se colore quelquefois en bleu très pur, et la roche ressemble alors à une agate, qui aurait la couleur d'une turquoise.

D'autres fois, la chaux phosphatée prend l'éclat et la couleur des dents vivantes ; ou encore elle forme des masses très finement ramifiées, celluluses et recouvertes de petites concrétions ayant l'aspect de certaines calamines.

Composition des minerais. — La teneur en acide phosphorique de ces minerais est très remarquable. A Pendaré, elle atteignait 72 p. 100 de

phosphate tribasique ; au début, à Lamandine, 82 p. 100 ; dans tout le Lot, en moyenne, 62 p. 100. La phosphorite contient de l'iode¹, du fluor et du soufre (surtout dans les variétés bleues ou brun foncé). On trouve, avec le phosphate, les produits ordinaires des altérations superficielles : argiles de décalcification ; fer hydroxydé pisolitique, constituant parfois une sorte de poudingue dont le ciment serait le phosphate ; peroxyde de manganèse interposé entre deux zones successives de chaux phosphatée, etc.

Faune. — Ces poches à phosphorites renferment une faune abondante et aujourd'hui bien connue, qui comprend : 1° une série ancienne oligocène allant du bartonien (45) à la fin du stampien (47) ; 2° après une interruption pendant le miocène et le pliocène, une autre série commençant au pléistocène ancien (57). Cette faune montre que les grottes à phosphates sont restées ouvertes pendant une période très prolongée et qu'elles constituent un type intéressant de spéléologie ancienne. Quelques-uns des animaux que l'on y trouve ont dû habiter les cavernes. On cite notamment, à ce propos, des brèches de chauves-souris et des insectes obscuricoles. Mais la grande majorité d'entre eux a dû être apportée du dehors par les eaux (échassiers, palmipèdes, équidés, tapiridés, ruminants, etc.).

Origine des poches à phosphorites. — L'origine des poches à phosphorite est aujourd'hui bien élucidée. A l'époque oligocène, le plateau tertiaire des Causses formait une surface continentale, sur laquelle se sont exercées des altérations analogues à celles qui se produisent aujourd'hui. Il y a eu alors formation de cavernes et d'abîmes², entraînement vers ces vides béants de produits empruntés à des sédiments remaniés et dissous et accumulation d'animaux en décomposition³. Ce phénomène s'est surtout accentué sur les bords du bassin, là où les phénomènes d'érosion ont mis à nu la surface du plateau jurassique, au voisinage de zones atteintes par les eaux douces de l'éocène. Pendant toute une longue période, les ossements se sont entassés dans ces fentes, où ils ont été phosphatisés. Le phosphate venait-il des matières organiques elles-mêmes, il ne le semble pas puisque les os englobés dans les phosphorites, au lieu d'avoir été attaqués, sont au contraire particulièrement bien conservés, à moins de supposer le phosphate emprunté à des dépouilles organiques disparues et concentré sur certaines pièces qui ont seules survécu. Il est beaucoup plus vraisemblable que cette phosphorite ait eu pour origine la concentration de légères teneurs en phosphate réparties dans les sédiments voisins, notamment dans les marnes oligocènes, qui arrivent à tenir 15 et 20 p. 100 de phosphate et, par là, ces gisements se rapprocheraient de ceux du Nassau

¹ Cette présence de l'iode n'est pas exceptionnelle. Nous la retrouverons, page 713, dans les phosphorites du Nassau.

² Nous avons depuis longtemps soutenu, comme E.A. Martel et Van den Brœck, que les phénomènes spéléologiques n'étaient nullement une caractéristique des périodes récentes, mais un simple facies continental, mieux protégé quand il était moins ancien. C'est un exemple des récurrences, dont nous avons cherché d'une façon générale à montrer la prédominance sur les phénomènes d'évolution dans la *Science géologique*. Nous reviendrons sur cette question à propos du fer.

³ Ces animaux sont souvent entiers et les os des ruminants et des rongeurs ne portent pas d'incisions montrant qu'ils auraient été d'abord tués par des carnivores.

étudiés plus loin ou de ce que nous avons dit plus haut pour la Palestine et le Pacifique. En tout cas, le phénomène s'est trouvé interrompu quand, au début de l'aquitainien, les eaux douces, recouvrant le plateau, y ont déposé la molasse de l'Agenais par-dessus les poches à phosphorites. Puis il est probable que tout l'ensemble est resté caché et protégé jusqu'au début du pléistocène, la faune néogène faisant défaut dans les phosphorites.

Mais, pendant le pléistocène, les grottes à phosphates ont été de nouveau rendues accessibles par la surface, les mêmes phénomènes ont recommencé pour une même cause et il s'y est déposé de nouvelles faunes, où Gaillard, Harlé et Stehlin ont trouvé des oiseaux, félins, sangliers, bovidés, etc., appartenant à cette période récente.

5° PHOSPHORITES DE TUNISIE

Nous signalerons, à titre de curiosités minéralogiques, l'existence de quelques phosphorites concrétionnées en poches du type Quercy dans le jurassique et le crétacé de Tunisie : phosphorites qui peuvent résulter d'une recristallisation des phosphates sédimentaires.

Plusieurs de ces phosphorites sont au voisinage d'amas calaminaires, qui, eux-mêmes, impliquent l'existence d'un métamorphisme intense exercé par les eaux de surface sur des gisements sulfurés primitifs : par exemple, au *Djebel-Reças*, à *Zaghouan* (où l'on en a fait une petite exploitation), au *Djebel-Dekma*, près Souk-Arrhas, etc. Dans certains de ces gites, la calamine et la phosphorite, mélangées par zones concrétionnées parallèles, sont fort difficiles à distinguer l'une de l'autre sans un examen approfondi.

Au *Djebel-Bebbar*, près Guelma, nous retrouverons des filons de phosphorite avec des amas calaminaires, qui eux-mêmes sont accompagnés de stibine, cinabre et barytine.

6° PHOSPHORITES DE L'ESTRÉMADURE

Cacérés, Logrosan, Zarza la Major, etc.¹

Il existe, dans le Sud-Ouest de l'Espagne, une grande zone de gisements phosphatés, qui se poursuit en Portugal dans l'Alemtejo et dont le développement total n'atteint pas moins de 120 km. de longueur sur 60 km. de largeur. Ces gisements, dont l'apparence est tout à fait filonienne, se trouvent encaissés dans les roches les plus diverses : dans le granite, aux environs de Portalègre et de Marvao en Portugal, ainsi qu'à Zarza la Major et Ceclavin (Espagne); dans les schistes cambriens à Logrosan ;

¹ 1845. DAUBENY and WIDDINGTON. *Occurrence of phosphorite in Estramadure*. — 1860. NORANJO Y GARZA et LINO PENUELAS. *Sur la phosphorite de Logrosan (Estramadure)*. (B. S. G. F., 2^e, t. 17, p. 157; Revista min. t. 11). — 1876. EGOZCUE et MALLADA. *Provincia de Caceres* (Mém. Com. mapa geologico de España; Voir un résumé dans la Revue de géologie; Ann. d. M., 7^e, t. 13, p. 250). — 1878. BADOUREAU. *Chaux phosphatée de l'Estramadure* (Soc. cent. d'agriculture, t. 38, p. 80). — 1878. CALDERON. *Fosforitas de Belmes* (Ann. Soc. Esp. Hist. Nat., t. 5; B. S. G., t. 7, p. 11). — 1879. CALDERON. *Fosforitas en el mediodia de Espana*. (Boletín del mapa geol., t. 6). — 1879. PETERMANN. *Note sur la phosphorite de Caceres* (Ann. de la Soc. de Belgique, t. 6, Liège). — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souterraines*, p. 116. — 1909. CHOFFAT. *Sur les filons de phosphorite de Logrosan* (Bul. Soc. belge geol., t. 23, p. 97 à 114).

ailleurs, comme à Cacérés, où ils ont atteint leur maximum de richesse, dans le calcaire dévonien.

Quelle est leur origine réelle, c'est ce qu'il est, dans l'état actuel de nos connaissances, bien difficile d'affirmer. Remplissage filonien, telle est la conclusion de ceux qui les ont étudiés sur place. Et, d'après leurs descriptions, il est certain que ces gisements présentent les apparences de fractures, remplies par une précipitation de solutions aqueuses, dans lesquelles le phosphate de chaux et la silice auraient été maintenus en dissolution grâce à l'intervention de l'acide carbonique et des alcalis. Ces fentes à phosphates se comportent, en effet, comme des fractures filoniennes, plus nettes et minces dans le granite, éparpillées dans les schistes, élargies dans les calcaires avec épanchements au contact des calcaires et des schistes. On y trouve des remplissages zonés composés de quartz et de phosphorite cristalline (avec même de l'apatite dans les géodes), encaissés entre des parois verticales. Enfin l'exploitation de Cacérés est descendue

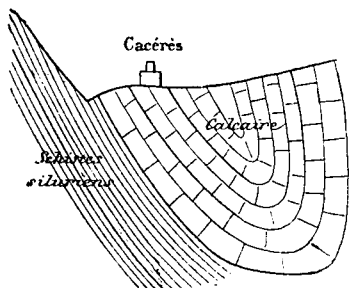


Fig. 109. — Coupe verticale théorique de la région de Cacérés.

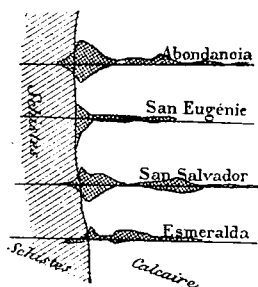


Fig. 110. — Plan théorique des filons de Cacérés.

à 150 m. de profondeur et la région présente des filons stannifères, dans le remplissage desquels l'apatite occupe sa place habituelle¹. Mais, si l'apparence filonienne des fractures doit être prise en considération, si, d'autre part, la précipitation aqueuse de la phosphorite dans ces fractures est évidente, nous sommes pourtant peu disposé à adopter la conclusion autrefois admise par Daubrée, Fuchs, etc., qui voyaient là un simple cas particulier des venues filoniennes hydrothermales alimentées par des fumerolles profondes. La comparaison avec les phosphorites du Quercy, où l'origine superficielle ne saurait plus guère se discuter, est, malgré des différences sur lesquelles nous venons d'insister, de nature à nous mettre en garde. Là aussi on trouve du phosphate ayant une allure filonienne, descendant à 105 m. de profondeur et encaissé dans du basalte comme dans du calcaire. On peut donc se demander s'il n'y aurait pas eu, dans les gisements espagnols, sous une forme un peu spéciale, introduction par en haut de solutions phosphatées empruntées, comme toutes les autres, à la décomposition continentale de terrains phosphatés ou de matières organiques et introduites dans des fractures tectoniques ou des ouvertures de failles, ainsi que l'ont été, par exemple, les sables néocomiens à iguanodons tombés à 310 m. de profondeur dans le houiller du Bernissart².

¹ Voir tome 2, page 37.

² Voir plus haut les observations faites, tome 1, pages 695 à 697.

Gîte de Cacérés. — La seule exploitation qui ait présenté de l'importance est celle de Cacérés, où, comme le montrent les croquis ci-joints (fig. 109 et 110), on a rencontré surtout des poches d'enrichissement à l'intersection de diaclases formant filons dans le calcaire dévonien et d'un contact entre ce calcaire et des schistes, dans des conditions où les remises en mouvement ont si souvent développé des gisements de calamine, de sidérose, de malachite, etc.

Les filons (Esmeralda, San-Salvador, San-Eugenio et Abundancia) sont

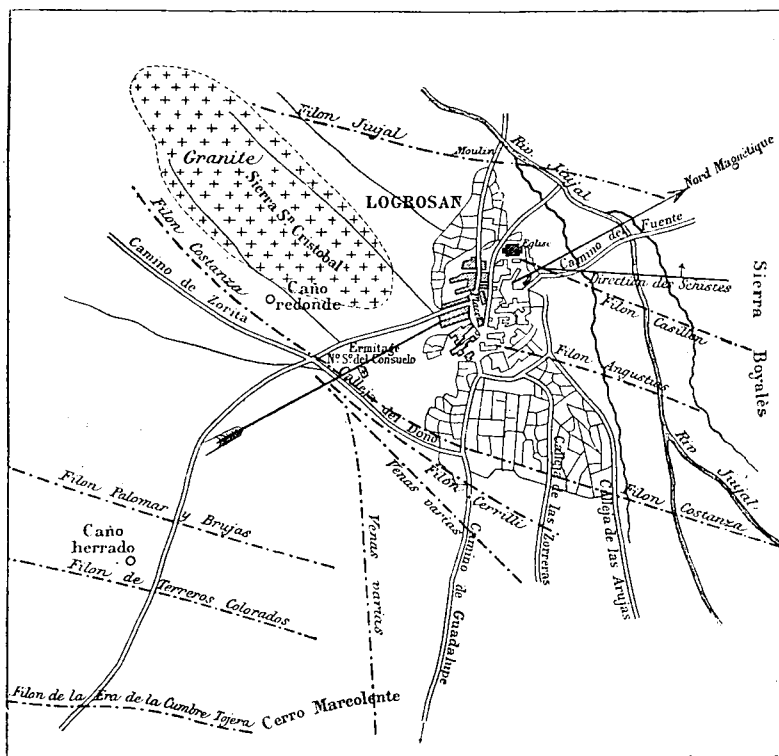


Fig. 111. — Carte des filons de phosphorite de Logrosan.

orientés Nord-Est et formés de phosphorite très cristalline, passant parfois à l'apatite dans les géodes, avec du quartz dont la proportion a été partout en augmentant avec la profondeur.

L'exploitation est descendue jusqu'à 150 m. de la surface dans l'un des filons et a été arrêtée là en 1887 par une disparition du gisement qui a été attribuée à une faille et qui pourrait tout aussi bien correspondre au coincement d'une poche superficielle. Auparavant on avait rencontré des difficultés d'épuisement considérables : le calcaire perméable formant, au milieu des schistes imperméables, un drainage de toutes les pluies, en sorte qu'on était arrivé à extraire en poids près de cinquante fois plus d'eau que de phosphate.

En résumé, la mine, où l'on avait fait des installations luxueuses, a été exploitée de 1865 à 1887 et a produit 5 à 600 000 t. de phosphates à haute teneur (jusqu'à 180 000 t. dans l'année 1869).

Gîte de Logrosan. — Ce gisement, exploité très superficiellement de 1863 à 1869 jusqu'à une profondeur maxima d'une quinzaine de mètres, a été étudié et décrit par P. Choffat en 1909, en vue d'une reprise. On y a signalé quelques minces filons, grossièrement parallèles dans leur ensemble et recoupant un terrain formé de schistes cambriens redressés par le massif de granite ancien qui forme la colline de San-Cristobal. Un ou deux petits filons pénètrent dans ce granite, mais s'y amincissent aussitôt et leur remplissage y devient entièrement quartzeux. Dans les schistes qui sont très fendillés, les filons ont une tendance à se diviser en imprégnant, sur une certaine largeur, le terrain encaissant et englobant des débris de schistes.

On doit signaler l'existence de quartzites granuleux imprégnés de phosphate comme les schistes, mais avec une très faible teneur.

Les filons sont orientés, en moyenne, au Nord-Est. L'un d'eux, celui de la Costanaza, a seul été utilisé industriellement. Son remplissage présente une structure zonée, alternativement composée de lamelles cristallines de phosphorite et de petits cristaux de quartz. D'après les observations de Fuchs que P. Choffat a discutées, ces derniers vont en augmentant avec la profondeur, et rendent toute la partie profonde du gîte inexploitable. En tout cas, cette proportion de quartz est extrêmement variable d'un point à l'autre.

Aux affleurements, ce filon a été suivi sur environ 6 km. de long et reconnu exploitable sur 1 km : sa puissance atteint 2 à 3 m. Il présente, en coupe comme en plan, de nombreuses alternatives d'élargissement et de rétrécissement. On en a extrait autrefois environ 20 000 t. Dans la reprise de 1909, on a reconnu, à 31 m. de profondeur, un filon renfermant 2,50 m. de minerai utile avec intercalation de quartzites.

Zarza la Major. — Enfin, à Zarza la Major, on a signalé des filons de phosphorite sans valeur industrielle, qui traversent le granite sur une longueur de plusieurs kilomètres, avec des sinuosités, suivant la direction moyenne NE-SW. Leur épaisseur varie beaucoup, tant dans le sens horizontal que dans celui de la profondeur ; un même filon passe de quelques centimètres à 3 m. La phosphorite, comme dans les gîtes précédents, est associée de la manière la plus intime à du quartz et quelquefois les deux substances sont disposées par zones parallèles. Au contact, le granite est ordinairement altéré.

A l'occasion de ces gisements, Daubrée a signalé la présence, à *Belmès*¹, de phosphate entièrement substitué à du calcaire carbonifère, où persistent des empreintes d'encrines.

D'après Egozcue et Mallada, il existe aussi, dans la même région, aux bains de Montemayor, Sierra de Béjar, des sources sulfureuses encaissées dans le granite, dont l'une, d'une température de 42°, contenait, dans le résidu de son évaporation, 9,7 p. 100 d'acide phosphorique². Ces obser-

¹ Coll. Ecole des Mines, 1678.

² L'acide phosphorique existe également dans les eaux de la Bourboule, Vichy, etc.

vations confirment le fait incontestable annoncé plus haut, que le phosphate est susceptible d'entrer en dissolution et de circuler ainsi à l'état de dissolution phosphatée. On ne saurait y voir une preuve que les phosphorites de Logrosan et de Cacérés aient une origine interne.

7° PHOSPHATES DU NASSAU¹

Les phosphates du Nassau furent découverts en 1830, en cherchant des minerais de manganèse. Une exploitation fut commencée à Staffel en 1863. Pendant une vingtaine d'années, ces mines ont extrait environ 30 000 t. par an : en 1889, 41 750 t. ; en 1890, 37 000 t. pour Diez et Weilburg. Elle sont aujourd'hui à peu près épuisées.

Les travaux étaient situés dans l'espace compris entre la ville de Weil-



Fig. 112. — Carte montrant la position des gisements de phosphates et de manganèse du Nassau.

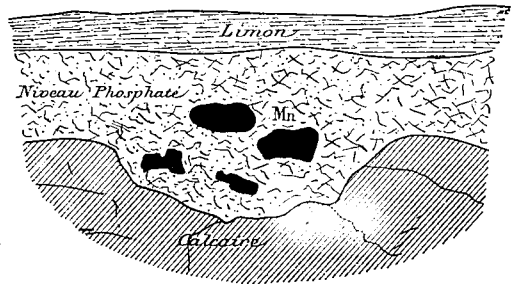


Fig. 113. — Coupe du gisement de Cubach, d'après Davies.

burg au Nord-Est, le Westerwald au Nord-Ouest et la ville de Diez au Sud. Au Sud de cette ville aussi bien qu'au Nord de Weilburg, on retrouve des traces de phosphates, mais inexploitable. A l'Est et au Sud, la région minéralisée est bornée par la rivière la Lahn (fig. 112).

Ces gisements constituent des poches argileuses à phosphorites dans le calcaire à stringocéphales eifélien (7). Leur formation est en rapport avec des phénomènes d'altération continentale (probablement éocènes), qui ont développé, dans la même région et dans les mêmes conditions, des minerais de manganèse également superficiels, sur lesquels l'attention se porte de temps en temps². C'est un de ces très nombreux cas où des concentrations, tantôt de phosphate de chaux, tantôt de manganèse ou de fer, ailleurs de baryum, exceptionnellement de cobalt, de zinc, de cuivre, etc.,

¹ Coll. Ecole des Mines, 1854. — STEIN (Jahrb. des Ver. der Naturk. im Herzogthum Nassau, t. 19). — 1868. DAVIES. *On the depos. of Ph. of lime recently discovered in Nassau* (Géol. Mag., p. 262) — 1877. VON DECKEN. *Ueber ein neues Vorkommen der Phosphorit bei Brilon* (V. Pr. Rh. u. West, p. 117). — 1883. FUCHS. *Notes de voyages inédites*. — 1885. PENROSE (Bul. U. S. géol. surv., n° 46).

² Voir tome 2, page 568, avec coupes, figures 281 à 284.

se sont faites par la surface dans des diaclases élargies du calcaire, au milieu d'argiles empruntées à la décalcification de calcaires supérieurs disparus.

Les figures 113 à 115 montrent, par exemple, des sables et argiles ferrugineux avec rognons de phosphorite et de manganèse, qui pénètrent en poches dans le calcaire ou passent en discordance sur le calcaire et les schistes (fig. 114) et qui peuvent être recouverts par une couche de limon avec lignite (fig. 113).

Les rognons de phosphorite des poches calcaires sont souvent blancs ou roses et agatisés (Bärenbach par exemple) et contiennent 70 p. 100 de phosphate avec 3 ou 4 de fluor et des traces d'iode.

On trouve, d'autre part, comme nous l'avons dit précédemment¹, dans

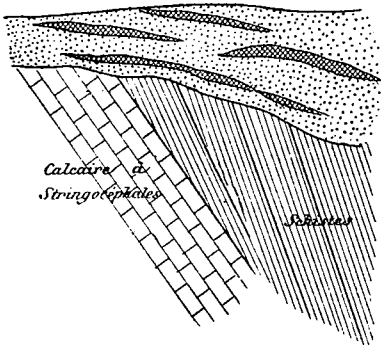


Fig. 114. — Coupe verticale près d'Arfurt, d'après Davies.

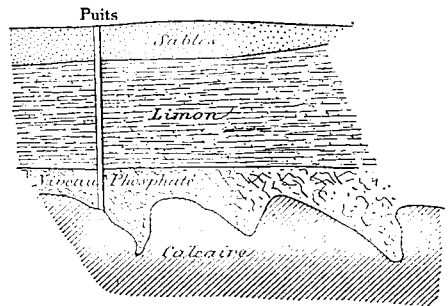


Fig. 115. — Coupe verticale du gîte de Frauenfels (Nassau).

les schistes fameniens, des nodules phosphatés bruns terreux à teneur beaucoup plus faible, qui ont pu contribuer à fournir une partie du phosphate, concentré beaucoup plus tard dans les altérations superficielles. Ces nodules ont commencé par s'accumuler dans les limons superficiels, où on les a un peu exploités.

8° DÉPÔTS PHOSPHATÉS DES GROTTES (Hérault, Algérie, Tonkin, etc.)²

Nous avons fait précédemment allusion à la possibilité que des gisements de guanos ou des accumulations d'organismes terrestres aient contribué à la formation de certains gîtes déjà décrits (îles du Pacifique, Quercy, etc.). Dans la majorité des cas, il semble que de tels gisements aient dû être restreints et incapables de constituer les grandes couches régulières et continues, produites, à notre avis, dans les zones littorales

¹ Tome 1, page 667.

² 1894. A. GAUTIER. *Sur un gisement de phosphates de chaux et d'alumine...* (Ann. d. M., 9^e, t. 5, p. 5 à 54). — 1895. LEVAT (d'après BOURBON). *Etude sur l'industrie des phosphates* (Ann. d. M., 9^e, t. 7, p. 69 à 72). — 1895. CARNOT. *Sur un gisement de phosphates d'alumine et de potasse trouvé en Algérie* (Ann. d. M., 9^e, t. 8, p. 311 à 321). — 1898. MINGAYE. *The occurrence of Phosph. depos. in the Jenolan Caves* (N. S. Wales, Sydney) (Austr. Ass. Adv. Sc., 8 p.).

de la mer par des accumulations d'innombrables organismes invertébrés. Rien là n'a pu être comparable à ces immenses développements de craies phosphatées ou de nodules, dans lesquels l'industrie puisera longtemps encore sans les épuiser. Cependant le type des phosphates venant de guanos existe en divers points et doit être ici étudié.

Armand Gautier a décrit, dans l'*Hérault*, des grottes à phosphates situées dans le calcaire éocène, à son contact avec le dévonien. L'une de ces grottes, dite de la Minerve, est particulièrement riche en phosphates de calcium et d'aluminium recouverts par une terre phosphatée à 2-18 p. 100 d'acide phosphorique renfermant de nombreux ossements (avec résidu de matière organique azotée). Ces phosphates sont remarquables par leur forte teneur en alumine (Minervite).

L'auteur de cette étude a montré, à ce propos, comment l'acide phosphorique des tissus animaux avait dû être entraîné par les eaux souterraines à l'état de phosphate d'ammoniaque d'origine bactérienne pour se reprécipiter sur les calcaires des parois ou des blocs éboulés, qui ont été transformés en phosphate de chaux. Le calcaire nummulitique ainsi transformé ne contenait antérieurement que 0,2 p. 100 d'acide phosphorique. C'est le phénomène de concentration phosphatée que l'on retrouve sur certains récifs coralliens calcaires où les oiseaux de mer déposent leurs excréments. En même temps, les matières azotées donnent du nitrate de calcium, qui, en présence du sel marin, a pu produire du nitrate de sodium analogue à celui du Chili.

Dans l'Ouest de l'Algérie (Oran), on a exploité, notamment près de la gare d'*Inkermann*, entre Alger et Oran, quelques dépôts phosphatés du même genre : dépôts sans grande importance pratique, comme les précédents.

Ce sont des phosphates de chaux, plus ou moins mélangés de phosphates alumineux, du type de la Minervite, qui se sont formés, à l'époque quaternaire, dans des fissures ou des grottes de terrains calcaires miocènes à mélobésies (helvétien) par la décomposition de matières organiques.

Il y a, généralement, sur le sol de ces grottes, une couche stalagmitique de phosphate de chaux concrétionné, blanc ou jaune clair, très riche, d'épaisseur variable; puis, au-dessus, des terres phosphatées, mélangées d'oxyde de fer, de sable et d'argile, parfois recouvertes elles-mêmes par des argiles de transport. Le dépôt suit naturellement tous les caprices ordinaires de la disposition de ces grottes. D'après une observation de Bourbon, dont les analyses d'Ad. Carnot ont tout au moins démenti la généralité, le calcaire, qui forme les parois, contiendrait jusqu'à 10 p. 100 de phosphate et aurait pu intervenir dans la constitution de certains gisements.

En dehors des phosphates de chaux concrétionnés que l'on a exploités, les phosphates alumineux peuvent être également utilisables.

Ad. Carnot a étudié l'un de ces gisements, situé dans la commune de *Misserghin*, à 10,4 km. d'Oran, près de la Tour Combes, sous forme de veines dans une couche de terre brun rougeâtre, recouvrant le sol d'une caverne à stalactites. Dans cette terre rougeâtre, les phosphates sont répartis en veines et en masses spongieuses blanchâtres ou bariolées de jaune, de rouge ou de noir. Les masses agglomérées sont rarement plus

grosses que le poing; elles sont arrondies, légères, onctueuses au toucher, faciles à écraser entre les doigts, surtout quand elles sont encore humides; elles happent fortement à la langue, quand elles sont sèches. La matière pure et blanche est comme farineuse; elle est formée de phosphate alumineux, avec de la silice en proportion variable et parfois un peu de phosphate de chaux; teintée en brun, elle renferme de l'oxyde de fer; d'autres fois, elle est colorée en noir par de l'oxyde de manganèse et un peu d'oxyde noir de cobalt.

Cette matière blanche est un phosphate d'alumine potassique, semblable à la minervite¹.

Il est assez curieux de constater qu'il y a eu là introduction superficielle, non seulement de potasse et de silice, mais aussi d'alumine en dissolution. Quant au phosphore, il provient de matières organiques, dont l'azote, après fermentation, a été éliminé sous forme de nitrates solubles.

Des grottes à phosphates analogues ont été récemment signalés au Sud du *Tonkin*.

Enfin, dans le même ordre d'idées, on peut citer la *colombine* de certaines cavernes servant, depuis des siècles, d'asile à des légions de chauves-souris (Jura, Illyrie, côte tunisienne, etc.), et surtout les grands amas de *guano* (îles Chinchas, Méjillones, Baker et Jervis, Galopagos), dont la teneur en phosphore, toujours inverse de celle de l'azote, a son minimum dans les régions où ils ne sont jamais délavés par les eaux atmosphériques, comme dans la zone désertique de la côte chilio-péruvienne.

G. — PHOSPHATES D'ALUMINIUM. TURQUOISES

Nous avons signalé plus haut la formation, dans certaines grottes et dépôts de guanos, de phosphates alumino-calciques, ou simplement alumineux, comme la minervite, qui pourraient à la rigueur trouver une application comme engrais². Il existe, d'autre part, un phosphate d'aluminium qui fait partie des groupements stannifères (wawellite) et un autre phosphate d'aluminium hydraté, la turquoise, généralement produit par des réactions de surface en présence de sels cuprifères qui lui ont donné une teinte bleue. Ce dernier, seul, trouve une application, surtout en Orient, comme pierre précieuse, avec des prix extrêmement variables suivant la qualité, dont l'appréciation dépend elle-même beaucoup de la mode. Il ne doit pas être confondu avec la fausse turquoise, odontolite ou ostéolite, qui est un simple phosphate de calcium, parfois même un ossement teinté en bleu par l'oxyde de cuivre. Cette odontolite est assez abondante en Perse, dans l'Oural, et se retrouve à Simone, en Gascogne, où

¹ Ad. Carnot a repris, à cette occasion, l'analyse de la minervite et constaté qu'elle renfermait également de la potasse.

² Le nom même de turquoise vient de ce que ces pierres ont été introduites en Europe par la Turquie. Les anciens les nommaient callais. On l'appelle parfois calaïte.

³ 1894. A. GAUTIER (Ann. d. M., janv.). — 1895. CARNOT. *Sur la composition de quelques phosphates d'alumine* (wawellites, turquoises, odontolites) (Ann. d. M., 9^e, t. 8, p. 321 à 329).

elle est formée d'ossement fossiles, en particulier de dents de Mastodon Angustidens¹.

En dehors de quelques gisements d'un intérêt purement minéralogique, comme celui de Jordansmühle en Silésie², les turquoises proviennent presque exclusivement de deux groupes de mines : celui de Nichapour à l'Est de la Perse, qui est toujours en exploitation et celui du Sinaï, qui a eu surtout une importance antique.

En 1890, on a exploité, pour la première fois, aux Etats-Unis, dans le nouveau Mexique, à la mine Castilian, entre los Cevrillos et Santa Fé, une mine de turquoises qui en a fourni, dans l'année, pour 52 000 fr.³

Turquoises de Nichapour⁴. — Les turquoises, qui jouent un si grand rôle dans l'ornementation orientale, ont, pour principal centre d'exploitation dans le monde, la région de Nichapour, en Khorassan.

Ce gisement de Nichapour présente des massifs de brèche trachytique à ciment ferrugineux, recouverts par des calcaires et tufs, et contenant des veines argileuses, où l'on trouve les turquoises, souvent enveloppées par de l'oxyde de fer. Dans la formation de ces pierres, il y a deux points à distinguer : 1° la production d'un phosphate d'alumine, et 2° sa coloration en bleu par le cuivre, phénomènes qui sont, jusqu'à un certain point, indépendants l'un de l'autre.

En ce qui concerne le phosphate, on peut se demander s'il y aurait eu, dans les fissures, introduction superficielle de solutions phosphatées, ayant emprunté leur minéralisation aux sédiments tertiaires, ou si ce phosphate provient des trachytes mêmes, dans la composition desquels il aurait pu entrer, soit du phosphate de chaux, soit même déjà du phosphate d'alumine. L'apatite est fréquente et parfois abondante dans des roches de ce genre, notamment, comme nous l'avons dit, dans les gisements classiques du cap de Gata, au Sud de l'Espagne⁵. Mais il n'est pas moins plausible de faire intervenir des sédiments phosphatés. La même question se pose, nous le verrons bientôt, pour les gites du Turkestan et du Sinaï qui se présentent également sous formes de fissures : les premiers dans un porphyre, les seconds dans le grès nubien. De toutes façons, les interventions superficielles sont du moins certaines pour ce qui concerne l'allure actuelle des gisements et, particulièrement, la couleur

¹ 1715. RÉAUMUR. (Mém. de l'Ac. des Sciences, p. 171.)

² 1845. GLOCKER. *Neues Vorkommen von Calait in Schlesien* (Ann. Phys. Poggendorf, t. 64, p. 633). — Turquoises de Thuringe (Z. f. pr. G., p. 332).

³ Turquoises des Etats-Unis (*Mineral Industry*, passim).

⁴ 1825. FRASER. *Journey into Khorassan*. — 1830. PRINSEP. *J. Examination of the minerals collected by E. Stirling, Esq., at the Turquoise Mines near Nishapour in Persia* (Glean. Sci., t. 2, p. 375-379). — 1862. KHANIKOFF. *Mémoire sur la partie méridionale de l'Asie centrale* (Paris). — 1877. TIETZE. *Bemerkungen über die Techtonik des Allurgebietes* (J. K. K. Geol. Reichs., Wien). — 1884. A. HOUTUM SCHINDLER. *The turquoise Mines of Nishapur, Khorassan* (Geol. Surv. Ind., t. 17, p. 132-142). — 1886. A. HOUTUM SCHINDLER. *Die Gegend zwischen Sabzwär und Mesched in Persien* (J. d. geol. Reichs., t. 36, p. 304-314). — 1888. TOUQUÉ. *Les turquoises de Nichapour* (Ann. des Mines Bull., t. 13, p. 563). — RECLUS, t. 9, p. 225. — SUÈSS, t. 3, p. 390. — 1912. H. D'ALLEMAGNE. *Du Khorassan au pays des Backhtiaris* (3 vol., Hachette).

⁵ T. 1, p. 639.

bleue des pierres. La turquoise est un minéral d'affleurement, qui est lié aux affleurements des filons cuprifères, comme les malachites, azurites, etc., ou, sur les affleurements des filons de plomb, ces phosphates colorés qu'on appelle les pyromorphites. La chaîne de l'Elbourz, où se trouvent les turquoises, contient d'assez nombreux gisements de cuivre, avec d'autres éléments métalliques (or, etc.). L'oxyde de fer, qui accompagne ces pierres, est manifestement le produit d'une oxydation de surface exercée sur des pyrites.

Industriellement, les principaux centres d'exploitation de Nichapour sont Abd-our-Rézagi, d'où l'on tire les turquoises les plus estimées ; Kébelai-kérim ; Dér-i-Kouh, mine fort ancienne et fort étendue ; Sér-i-Reuh, d'où viennent des turquoises qui se ternissent rapidement à l'air, en perdant leur humidité ; Eudjir, etc.

On attache beaucoup d'importance à la classification des pierres, dont les plus estimées ont une teinte bleu de ciel foncé (*Engouchleri*, de première qualité ; *Barkhaneh*, intermédiaires, et *Arabi*, inférieures).

Les quatorze mines de turquoises exploitées étaient louées, en 1878, pour 77 000 fr. Actuellement, environ 200 hommes y travaillent, paraît-il, et produisent 200 000 fr. de turquoises par an. L'exploitation se fait, soit par fouilles au jour, soit par puits et galeries ne dépassant guère une quarantaine de mètres de profondeur.

L'exportation a lieu par Méched ou Téhéran, à destination de la Russie.

Turquoises du Turkestan. — On connaît à 40 km. N.-E. de Khodjent, dans le mont Karamazar, un autre gisement de turquoises. Les veines contenant ce minéral s'y présentent dans des diaclases d'un porphyre feldspathique, où elles tirent peut-être leur couleur de quelque formation cuprifère, comme on en trouve d'assez nombreuses, dans ces conditions, près de là. Ces veines ont, au maximum, 2 à 3 cm. d'épaisseur.

Turquoises du Sinaï¹. — Les anciens Égyptiens ont exploité avec activité des gisements de turquoise, malachite et oxydes divers de cuivre et de manganèse, qui remplissent des fissures du grès nubien dans la presqu'île du Sinaï. Ces turquoises leur servaient à l'ornementation, les oxydes et carbonates de cuivre à la coloration des émaux ou porcelaines ; mais on a dû, en outre, extraire du cuivre dans les mines de *Sarbout el-Khâdim*, au voisinage desquelles se trouvent des amas des scories.

Sur les mines antiques du Sinaï, les documents et les textes ne manquent pas. Dès l'aube des temps historiques, les Monitou, qui vivaient dans ces pays arides et sillonnés d'orages terribles, avaient découvert des mines au N.-W. entre le Djebel el-Tih et le golfe de Suez, dans le Maskait, ou pays des turquoises : nom qui passa plus tard au pays tout entier.

¹ Voir L. DE LAUNAY. *Richesses minérales de l'Afrique*, p. 284 et 285 et Bibl. citée ; notamment : BRUGSCH. *Wanderung nach den Türkis-Minen*. — *Ordnance Survey of the Peninsula of Sinaï*. 4 vol. de texte ; 3 vol. in-fol. de fotogr. 4 vol. de cartes et plans (Public. officielle) (voir p. 223-224). — 1895. MASPERO. *Histoire ancienne de l'Orient classique*, t. 1, p. 349, 355, 473, avec cartes des mines. — 1901. W. F. HUME. *Les Rifvalleys de l'Est du Sinaï et la géologie du Sinaï Oriental* (Congrès géol. de 1900. Compte rendu, p. 900 à 932). — SUËSS. *Face de la Terre*, 1, p. 470 à 472.

Puis les exploitations furent continuées par les Pharaons, pendant tout l'ancien Empire.

Géologiquement, ces mines sont situées, dit-on, dans le grès nubien, au voisinage du granite, qui se montre dans l'Ouady-Magharah. Ce sont, probablement, des affleurements de filons cuivreux (avec fer et manganèse), sulfurés en profondeur, qui ont subi une oxydation superficielle et, sans doute, des remises en mouvement dans les fissures de ces grès très perméables aux eaux. Peut-être ces grès renfermaient-ils quelques phosphates, qui auront produit les turquoises. Il en est résulté des gites restreints, par veinules ou poches, dont l'épuisement à peu près complet est rendu vraisemblable par la très grande activité que les anciens y ont témoignée, avec une main-d'œuvre à bon marché d'esclaves et de prisonniers. On s'est demandé toutefois si l'on ne pourrait pas exploiter des filons cuivreux de la profondeur.

D'autres gites de turquoises se retrouvent, plus au Sud, à l'ouest du couvent de Sinaï, dans le *Djebel Serbât*, que l'on a identifié, plus ou moins vraisemblablement, avec l'Horeb de la Bible. L'Egypt. Develop. Synd. a fait, en 1900, quelques recherches près d'*Éribia*.

CHAPITRE XX

VANADIUM

V = 51,06⁴

I. — PROPRIÉTÉS, USAGES, STATISTIQUE ET COMMERCE

Historique. — Le vanadium fut réellement découvert en 1803 par Del Rio dans un minerai de plomb mexicain de Zimapan et appelé alors Erythronium; mais, plus tard, ce chimiste crut s'être trompé. C'est seulement en 1830 qu'un autre savant, Sefström, le retrouva dans un minerai de fer de Norvège donnant un fer d'une ductilité extraordinaire, qu'on avait extrait de la mine de Taberg en Småland. Dès ce moment, on reconnut la concentration du vanadium dans les scories d'affinage de la fonte de fer provenant de ce gisement.

Des scories de ce genre ont été longtemps la source industrielle principale du vanadium.

Affinités chimiques. — On sait que le vanadium et le phosphore donnent des sels isomorphes, vanadinite et apatite, etc. ; de même, tous deux sont diffusés, dans des conditions analogues, dans divers minerais de fer. D'autre part, en métallogénie, le vanadium s'associe parfois à l'uranium, au bismuth et à d'autres métaux du groupe stannifère. Chimiquement, on connaît toute une série de phospho-vanadates, arsénio-vanadates, tungsto-vanadates, molybdo-vanadates, etc.

Usages. — Pendant longtemps, le vanadium, étant très rare, a eu peu d'usages. Berzelius en avait fait une première application dans la préparation d'une encre noire formée d'une combinaison de vanadate d'ammoniaque avec la noix de galle ou le pyrogallol. Plus tard, vers 1870, ses combinaisons ont trouvé un emploi dans l'industrie de l'impression des étoffes avec les couleurs dérivées de la houille. Le vanadate d'ammoniaque sert alors à transformer, en présence du chlorate de potassium et de l'acide

¹ 1882. RICCIARDI. *Sulla diffusione del Vanadio nel regno minerali e vegetali* (In-4^o, 6 p. Ext. d. Atti dell'Academia Givonia di sc. nat. in Catania). — 1883. DIEULAFAIT (REV. Scientifique du 19 mai, p. 613). — 1899. VOGT. *Ueber die relat. Verbr. des Vanadins in den Gesteinen* (Z. f. pr. G., p. 274 à 277). — 1908. E. K. JUDD. *The mineral Industry for 1907*, p. 892; *ibid.*, 1909 avec bibl. — NICOLARDOT. *Le vanadium* (Encyclopédie Léauté) et bibl. — 1909. ESCARD. *Les métaux spéciaux* (1 vol., Dunod). — 1911. THOMAS F. V. CURRAN. *The min. Ind. for 1910*, p. 668 à 672.

chlorhydrique, l'aniline en noir d'alinine ¹. De plus, dans des conditions qui semblent encore assez mal connues, ses sels peuvent donner de très belles couleurs sur porcelaine ou sur verre. Le bronze de vanadium sert pour les enluminures. Les sels de vanadium fournissent des révélateurs en photographie. Le vanadate d'ammoniaque est employé dans les laboratoires comme réactif du tannin. Enfin on a essayé de l'utiliser en médecine.

Mais toutes ces applications étaient restreintes jusqu'au jour où l'on a commencé à fabriquer des aciers au vanadium, dont l'emploi a pu lui-même se généraliser grâce à la découverte de toute une série de minerais fournissant aujourd'hui ce métal en quantités relativement abondantes.

Par son action sur l'acier, le vanadium se rapproche du carbone, du phosphore, de l'arsenic ou du cuivre, qui augmentent brusquement la limite élastique, la charge de rupture de l'acier. Il s'écarte, au contraire, des métaux comme le nickel, le manganèse, le chrome et surtout le tungstène, avec lesquels ces qualités s'accroissent lentement.

Les premiers essais d'acier au vanadium, faits à Firminy en 1896, amenèrent à constater une augmentation notable de la limite d'élasticité et de la charge de rupture, avec un durcissement remarquable sous l'influence d'une élévation de température. En 1900, Arnold fit, à Sheffield, des essais méthodiques montrant les excellents résultats obtenus avec des aciers au vanadium à 0,6 p. 100 maximum de vanadium. Des outils en acier trempé à 0,3 p. 100 de vanadium se montrèrent supérieurs, pour les fraises, forets, etc., à des outils à 3 p. 100 de tungstène, avec des propriétés analogues. En 1902, on reconnut que des plaques de blindage en acier-nickel vanadié à 12 p. 100 de nickel et 0,5 p. 100 de vanadium pouvaient, grâce à l'addition du vanadium, présenter une égale résistance, avec une épaisseur moitié moindre.

La difficulté pour incorporer le vanadium dans l'acier est dans la très grande affinité du vanadium pour l'oxygène et pour le carbone, qui exige des précautions encore plus rigoureuses que pour l'élaboration des aciers au chrome. Cette introduction se fait sous la forme de ferro-vanadium à 30-50 p. 100 de vanadium.

Prix. — L'histoire industrielle du vanadium a passé par trois phases successives. Après l'avoir cru très rare, on a reconnu sa diffusion fréquente dans les roches et, par suite, dans les sédiments qui résultent de leur altération sur place ou de leur remaniement (bauxites, argiles, grès cuprifères), ainsi que dans certaines essences de bois et dans les cendres de houille. On a alors commencé à l'extraire péniblement de quelques sédiments semblables.

Enfin, après avoir tiré le vanadium de terrains qui en renfermaient de faibles traces, on a trouvé récemment plusieurs points dans le monde, où sa concentration s'est faite en véritables minerais.

Le prix a subi, en conséquence, de grandes variations.

Le vanadium a valu longtemps plus de 1 000 fr. le kgr. et le vanadate de sodium préparé à Joachimsthal, 90 fr. Vers 1870, quand on com-

¹ Après avoir été un moment délaissé pour le cuivre et le cérium, le vanadium a repris son importance dans la teinture depuis 1896.

mença à employer le vanadium en teinture par la méthode Witz, pour remplacer le cuivre, son prix était de 400 fr.

En 1878, on organisa son extraction au Creusot sur la base de 60 t. par an et le prix descendit à 300 fr. La mise en valeur des minerais américains a abaissé, en 1903, le kg. de vanadium à 42 fr.

En 1907-1908, on a vendu aux Etats-Unis le vanadate de fer à raison de 20 fr. environ par kg. de vanadium métallique contenu. Le ferro-vanadium exempt de carbone valait 50 fr. par kg. de vanadium (au lieu de 80 fr. en 1904). Le prix de l'alliage électrolytique contenant 1 à 4 p. 100 de carbone était beaucoup moins élevé.

En 1910, on a vendu les minerais à raison de 5 fr. par kg. d'acide vanadique contenu, et le ferro-vanadium entre 40 et 50 fr par kg. de vanadium métal¹.

Statistique. — La principale source de vanadium paraît être au Pérou, où l'on exploite un asphalte vanadifère. De juin 1906 à janvier 1909, ces mines ont expédié aux Etats-Unis, à Pittsburg, 1 800 t. de minerais oxydés à 20 p. 100 d'oxyde de vanadium.

Il a existé également, dans ces dernières années, une exploitation importante auprès de Telluride, au Colorado, qui, avec la précédente, fournissait le ferro-vanadium utilisé aux Etats-Unis, où l'on consomme environ, par an, 160 t. de vanadium métal à l'état de ferro-vanadium.

En 1910, on a trouvé des gisements nouveaux de descloizite, ou mottramite, dans l'Afrique Orientale et dans le Turkestan, avec des minerais à 10-12 p. 100 de V²O⁵ et 4 p. 100 de cuivre.

II. — MÉTALLOGÉNIE DU VANADIUM

Minerais. — Le seul minerai de vanadium non oxydé est la *patronite*, sulfure de vanadium à 15 p. 100, que l'on trouve à Minasragra (Pérou).

Tous les autres composés sont des combinaisons oxydées, dans lesquelles l'acide vanadique, jouant le rôle d'acide, se combine avec le plomb, le cuivre, le bismuth (descloizite, mottramite, puchérite), comme pourrait le faire l'acide phosphorique : parfois (ainsi que le phosphore) avec addition de chlore dans la vanadinite.

TABLEAU 32. — TENEUR DES MINERAIS DE VANADIUM

La <i>descloizite</i> , vanadate de plomb (et zinc accessoire) tient.	22,70 de V ² O ⁵
La <i>vanadinite</i> , chloro-vanadate de plomb, isomorphe avec l'apatite (Arizona, Nouveau-Mexique)	19,40
La <i>mottramite</i> du Cheshire, ou <i>chiléite</i> , ou <i>psittacinite</i> , vanadate de plomb et cuivre	18,85
La <i>volborthite</i> de l'Oural, vanadate de cuivre, calcium, baryum	19,60
La <i>puchérite</i> , vanadate de bismuth	28,2
La <i>roscoélite</i> du Colorado, où mica vanadique	24 p. 100
La <i>carnotite</i> , K ² O 2U ² O ³ V ² O ⁵ 3H ² O tient, avec 63,54 de U ² O ³ .	20,1

¹ A la même époque, on vendait, au détail, comme produits chimiques, le vanadium 3,50 fr. le gr. ; le vanadate d'ammoniaque 90 fr. le kg. ; le vanadate de sodium 0,20 fr. le gr.

D'autres variétés plombo-zincifères se nomment *dechénite*, *eusynchite*, etc. ¹.

Mais, en outre, le vanadium existe disséminé dans beaucoup de minerais de fer, d'où il passe, avec l'acide phosphorique, dans la fonte, qui devient alors une source industrielle de vanadium.

Gisements de vanadium. — Le vanadium est un métal très répandu dans la nature, mais généralement répandu en très faibles traces. Sa proportion par rapport à celle du phosphore peut être comparée à celle du phosphore par rapport au fer.

D'abord disséminé dans les inclusions et ségrégations des roches, notamment en compagnie du fer, du chrome, du titane, du cuivre, du nickel, il a pu commencer à s'y rassembler par certaines réactions de métallurgie ignée analogues à celles qui, dans le traitement des minerais de Taberg ou dans le procédé industriel du Creusot signalé plus loin, font passer le vanadium avec le fer, d'abord dans la fonte, puis dans la scorie d'affinage.

Dans certains cas assez rares, le degré de concentration plus avancé, que représentent en principe les réactions filoniennes, a même pu se réaliser pour le vanadium par un déplacement hydrothermal immédiatement connexe des phénomènes ignés. Peut-être doit-on attribuer à cette origine certains minerais sulfurés de vanadium, tels que la patronite, peut-être même certains vanadates qu'on pourrait comparer aux phosphates primitifs (et non introduits par le dehors) de divers filons, notamment dans le groupe de l'étain.

Les micas vanadiés, ou roscoélites, des régions aurifères de Californie pourraient également être dus originellement à une réaction ignée.

On remarque, dans ces gisements, une association du vanadium avec le molybdène, l'uranium, et des matières radio-actives, qui contribue à rapprocher le vanadium des métaux du groupe stannifère ayant comme lui des combinaisons habituellement oxydées ².

Le rôle des hydrocarbures, que nous retrouverons dans les sédiments vanadiés, paraît, en même temps, très caractéristique, comme il l'est aussi bien souvent pour le cuivre. Nous allons voir divers gisements de vanadium associés avec des produits bitumineux, ou même avec des combustibles (Minasragra, Yauli, Oklahoma, San Raphael).

Mais la grande influence enrichissante a été, pour le vanadium, l'action dissolvante, qui s'est opérée par l'intervention des eaux de surface, soit dans les sédiments, soit surtout sur les produits d'altération filoniens. Le vanadium s'oxyde à l'air en donnant un acide vanadique ocreux, qui se dissout à raison de 0,5 gr. par litre et qui se combine avec les alcalis mis en mouvement par l'altération des mêmes roches.

Une fois ainsi déplacé par les eaux, le vanadium a pu s'y représenter dans les sédiments par les réactions qui reprécipitaient aussi les oxydes de fer, d'aluminium, de titane. L'action précipitante des matières hydrocarbonées l'a quelquefois associé au cuivre.

¹ Cf. 1901. DIESELDORFF. *Sulvanit, ein primäres Vanadin Mineral* (Z. f. pr. G., p. 423).

² En analyse, le vanadium se retrouve avec le tungstène, qui appartient à ce groupe.

Aux affleurements des filons, de tels vanadates, agissant sur les sulfates ou les carbonates insolubles qui tendaient à se former, notamment sur ceux de plomb, cuivre, bismuth, uranium, ont donné les vanadates correspondants, qui, en raison de cette origine, disparaissent toujours à faible profondeur dans les remplissages filoniens, comme le font les oxydes de manganèse, de cobalt ou de baryum, comme aussi les phosphates, arséniates et molybdates de plomb ou de cuivre.

Nous allons étudier successivement :

A. Ségrégations directes de vanadium.

B. Filons sulfurés et hydrocarburés de vanadium.

C. Concentrations oxydées de vanadium sur des affleurements de filons de plomb, cuivre, bismuth, etc.

D. Gisements sédimentaires ; associations avec l'aluminium, avec le fer, avec le cuivre, avec les matières hydrocarburées.

A. — INCLUSIONS ET SÉGRÉGATIONS VANADIQUES

Le vanadium existe, comme le phosphore, dans beaucoup de météorites, mais seulement dans les météorites asidères, tandis que les fers météoriques n'en contiennent pas.

Il est tout naturel d'en retrouver dans les ségrégations des magmas basiques et c'est, en effet, ce qui se produit dans un certain nombre de magnétites, telles que celles de Taberg en Småland, où on l'a bien reconnu pour la première fois, et dans quelques titano-magnétites (Adirondacks), ou fers chromés, etc.

B. — FILONS SULFURÉS ET HYDROCARBURÉS DE VANADIUM

(Pérou, Oklahoma, Nevada) ¹

Minasragra (Pérou). — On exploite à Minasragra, à environ 46 km. du Cerro de Pasco, un curieux gisement, qui semble représenter la formation filonienne sulfurée du vanadium avec association de matières hydrocarburées.

En ce point, un système de terrains allant du trias au crétacé et inclinés à environ 45° est traversé par des roches tertiaires diverses (trachytes, andésites, microgranites, diabases), dont on ignore la relation avec le gisement.

Au voisinage, s'intercalent, dans des schistes verts et rouges et des calcaires feuilletés, des lentilles vanadifères, formées de veines transversales à la stratification, dans lesquelles le vanadium se trouve à l'état de patronite : un sulfure renfermant, suivant les analyses, des proportions variables de sulfures de vanadium, molybdène, nickel et fer, avec du soufre libre, de la silice, de l'acide titanique, et de l'alumine. Purifiée, la patronite semble contenir 20 à 24 p. 100 de vanadium et répondre à la formule $V^2S^5 + nS$; mais elle est mélangée de pyrite nickélifère et de molybdénite.

¹ 1906. HEWETT. (Eng. and min. J., 1^{er} sept. p. 385). — 1907. J. KENT SMITH. (Bull. Am. Inst. min. Eng., sept.). — 1907. HILLEBRAND. (Journ. Am. Chem. Soc., t. 29, n° 7, p. 1019-1029). — 1909. HEWETT. *Vanadium deposits in Peru* (Trans. Am. Inst. Min. Eng. fév., p. 291-316). — 1909. HERR. FLECK. *Rare metals* (Quart. of Colorado School of mines, janv.). — 1909. BECK. t. 1, p. 538.

Dans la veine principale, large de 5 m., qu'on a pu suivre sur 65 m. de long jusqu'à 50 m. de profondeur, on a, au mur, environ 2,4 m. d'une masse noirâtre passant au vert qui contient surtout la patronite; puis 0,90 m. d'un produit ressemblant à du coke et donnant une cendre vanadiée; 1,20 m. à 1,80 m. d'un produit bitumineux sulfuré à 46,61 de soufre et 42,81 de carbone, avec seulement 0,91 d'hydrogène que l'on a improprement pris pour de l'asphalte et que l'on dénomme quisquète.

A la surface, ce filon donne des produits oxydés de vanadium.

Colorado. — Au Colorado, à *Paradox Valley*, on a fait un essai d'exploitation récente sur un filon contenant un sulfate de vanadium bleu noirâtre à 7-14 p. 100 de vanadium et 6 p. 100 de soufre que l'on a appelé la kentsmithite; il est accompagné d'un vanadate de chaux hydraté.

Joachimsthal (Bohême). — L'une des sources, d'où l'on tira longtemps le vanadium, était la mine de Joachimsthal, en Bohême¹.

La pechblende de Joachimsthal contient environ 0,1 p. 100 de vanadium à un état mal connu. Ce vanadium se retrouve dans les dolomies à teinte rouge qui accompagnent ordinairement les minerais d'uranium.

Une telle association du vanadium avec l'uranium, le molybdène et avec les matières radioactives n'est pas, nous l'avons dit, un cas exceptionnel. Le groupement avec l'uranium constitue notamment la carnotite, qui forme des gisements au Colorado². Il est à remarquer que ce gisement de Joachimsthal, dont nous donnerons la description au chapitre de l'uranium³, présente des indices nombreux d'altérations superficielles et de remises en mouvement ayant pu contribuer à la concentration de vanadium.

C. — AFFLEUREMENTS VANADIÉS DE FILONS MÉTALLIFÈRES

En énumérant les minerais de vanadium, nous avons mentionné un certain nombre de vanadates. Ceux-ci se développent sur les affleurements de divers filons de plomb, de cuivre, de bismuth, dans des conditions tout à fait analogues à celles où se produisent des phosphates, molybdates, arsénates, etc.. (pyromorphite, wulfénite, mimétèse).

Dans quelques cas, il est possible que l'on ait affaire à la concentration superficielle d'éléments vanadiés qui auraient préexisté dans le filon, à la façon par exemple des sulfures de vanadium (patronites) que nous avons mentionnés au Pérou, ou peut-être aussi en combinaison analogue à l'apatite. Mais, le plus souvent, on peut supposer que le vanadium aura été introduit par le dehors, comme cela semble si souvent se produire pour le phosphore. En tous cas, son développement problématique est lié à celui des autres corps que nous avons déjà souvent signalés comme se concentrant dans les altérations superficielles, tels que le baryum, le manganèse, le cobalt, etc.

¹ 1856. VON HAUER. *Ueber Gew. von Vanadin aus den Joachimsthaler Uranerzen* (Sitzb. Ac. des Sc. de Vienne, t. 20, p. 37). — 1880. LALLEMAND. *L'urane et le vanadium à Joachimsthal*. (Ann. d. M., 7^e, t. 17, p. 326).

² Voir plus loin, tome 2, page 726.

³ Tome 2, pages 80 à 84.

Nous nous contenterons de citer quelques exemples de ces sortes de gisements qui, après avoir fourni un moment des minerais très riches, s'épuisent en général rapidement. Ce sont ceux d'où l'on extrait actuellement une grande partie du vanadium. Les plus importants sont dans l'Amérique du Sud ; mais les Etats-Unis en renferment également.

Arizona. — Dans cet état américain, les affleurements plombifères renferment assez fréquemment des vanadates, parfois avec des molybdates, sans qu'il en ait été fait d'exploitation. Aux mines de plomb de Castle Dome et grand Central (comté de Yuma), la vanadinite (chloro-vanadate de plomb) se présente vers le niveau hydrostatique en association intime avec de la wulfénite jaune et de la cérusite.

On a obtenu un produit mécaniquement concentré à 18 p. 100 de V_2O_5 .

New Mexico. — Près de *Magdalena*, on a trouvé un vanadate à 7 p. 100 d'oxyde de vanadium sur l'affleurement d'un filon de galène argentifère avec minerais de cuivre.

Les principaux gisements de vanadinite dans cette région sont ceux des *Monts Caballos* (Cook's peak et Percha Creek).

Mexique. — La vanadinite, où del Rio a trouvé d'abord le vanadium, provenait de *Zimapan*, au Mexique¹. Il existe encore, dans le même pays, à *Charcas* (San-Luis Potosi), une mine exploitée pour argent, qui contient des veines assez continues de vanadate de plomb cristallisé vert cireux ayant de 5 à 8 millimètres d'épaisseur. Ce vanadate, associé à de la calcite, traverse un grès et s'est déposé tout d'abord sur les épontes : la calcite étant dans l'axe du filon. On a également signalé : les minerais de plomb vanadiés de Chihuahua (Mina San Francisquito à Villa Rasales et Mina Aurora y San Pedro à Cuchillo Parado) ; les vanadinites et wulfénites de Zacatecas ; les descloizites de Pozos (Guanajuato) et de la Sierra Coronada (San Luis Potosi).

Cruz del Eje et province de San-Luis (Argentine). — A Cruz del Eje, province de Cordoba, on a mis en exploitation des filons, dont les minerais à 10 p. 100 étaient exportés, par Pase Vieje et Buenos-Ayres, à Paris. Ces minerais ont disparu en profondeur pour ne laisser que de la galène.

On cite également, dans le district de Guaico (Cordoba), les mines de plomb Venus, Rara Fortuna, Bien Venida comme ayant donné des minerais vanadiés.

Bodenbender a décrit, dans la province de San-Luis, un filon de quartz et galène avec hématite un peu aurifère et divers minéraux de vanadium ou de molybdène. Le quartz avec hématite aurifère, qui doit représenter une première phase du dépôt, occupe les deux épontes. Au centre, on a des carbonates, calcite et cérusite, avec une plombo-calcite à forte teneur en molybdène et phosphore et de la goëthite et, dans des géodes, de la vanadinite, de la cérusite, un silicate de cuivre molybdé, etc.

Un second filon voisin contient du quartz et de la plombo-calcite, avec un molybdate voisin de la wulfénite et de la vanadinite. Les vanadates

¹ Coll. Ec. d. M. 2936. — *Mineral industry for 1910*, p. 670.

occupent les géodes de la plombo-calcite et semblent résulter de l'action d'eaux chargées d'acide vanadique sur la wulfénite. Suivant l'auteur, ces filons seraient en relation avec des pegmatites, qui ont également déterminé, dans la même région, des filons de wolfram et d'autres contenant un carbonate de bismuth chloro-fluoré avec wolfram, tantale, niobium et traces de cérium.

Talcuna (Chili). — A Talcuna, 6 km. N. de Marqueza (Coquimbo) on exploite, depuis 1870, des filons cuprifères, entre lesquels se trouve une terre jaune renfermant 6 p. 100 de vanadium. En 1900, on a commencé à extraire ce minéral d'altération qui, vers 20 m. de profondeur, a disparu. Le vanadium y était associé à du sulfate de baryte et à un peu de cuivre.

On connaît également de la vanadinite sur l'affleurement d'un filon de plomb et de cuivre à la *Mina grande* (mine de la Marqueza) au Chili.

Algérie. — Dans le Djebel Grouz, on a signalé une association de vanadinite avec smithsonite, limonite, pyromorphite et mimétèse.

Santa-Marta (Espagne)¹. — Dans la province de Séville, on a exploité un filon de vanadinite argentifère ayant au maximum 0,10 m. de large et encaissé dans des argiles, riches aussi en vanadium. Le gisement est à 40 km. de la gare de Safra. On y signale un grès rougeâtre, qui contiendrait, paraît-il, jusqu'à 6 p. 100 de vanadium.

Oural. — La volborthite se présente, avec des phosphates de cuivre, sur les affleurements de quelques filons.

Kapunda (Australie du Sud). — En 1904, on a signalé à Kapunda des affleurements filoniens de vanadates métallifères.

D. — SÉDIMENTS VANADIÉS

Nous avons dit, en commençant, la grande diffusion du vanadium dans les sédiments détritiques, d'origine continentale. Quelques-uns d'entre eux ont fourni autrefois, dans le Cheshire, ou à Mazonay, une partie du vanadium industriel. Un tel gisement, par lequel nous commencerons, donne lieu encore aujourd'hui à une exploitation importante dans le Colorado. C'est, comme nous allons le voir, un type assez spécial de grès micacé à mica vanadié. Nous classerons les autres sédiments d'après le rapprochement qu'y accuse le vanadium avec le fer, le cuivre, ou avec des matières hydrocarburées.

1° GRÈS A MICAS VANADIÉS ET A CARNOTITE

Telluride (Colorado)². — Les gisements de *Big Bear Creek*, à 22 km. W de Telluride, sont exploités, depuis 1906, par la Vanadium Alloys C^y.

Les dépôts forment des imprégnations dans un lit de grès blanc, épais

¹ Coll. Ec. d. M. 2936.

² Coll. E. d. M. 2939 (Newmire).

de 3 m., au-dessus d'autres lits de grès rouges et sous un banc de calcaire noir.

D'une façon générale, le vanadium, associé à un peu d'uranium, est très largement disséminé dans les comtés de San Miguel et de Montrose et dans le S.-E. de l'Utah ; mais on ne peut l'extraire qu'en un petit nombre de points. A Big Bear Creek, le minerai vanadifère est un mica vert olive nommé roscoélite, qui donne au grès une couleur sombre là où il est le plus riche. Quand on examine ce grès au microscope, on voit les grains de quartz enveloppés d'un minerai vert feuilleté analogue à la chlorite, qui est la roscoélite. La teneur moyenne des parties exploitées est de 3 à 5 p. 100 d'oxyde de vanadium. Parfois, dans les dépôts de Placerville, un peu de carnotite, où l'uranium vient s'associer au vanadium, se montre, en outre, en taches jaunes à la base de la zone vanadifère. Cette carnotite devient prédominante dans l'Ouest du comté de Montrose. Elle accuse la généralité de l'association vanadium-urane, que nous avons déjà trouvée, dans d'autres conditions, à Joachimsthal.

On a extrait à Newmire, comté de San Miguel, de l'oxyde de vanadium destiné à produire du vanadate de fer. En 1907, la production du Colorado a été de 1042 t. à 2 p. 100 de vanadium ; en 1908, de 1500 t. tenant 29 t. de vanadium.

A *Placerville* (Colorado), on a trouvé des gisements importants de roscoélite et de carnotite dans des grès jurassiques.

2° MINÉRAIS DE FER ET BAUXITES (MAZENAY, ETC.)

Sainte-Claire Deville a reconnu, en 1859, la diffusion du vanadium dans les bauxites. On l'a retrouvé dans diverses argiles (Gentilly, Forges-les-Eaux). Mais la présence du vanadium a été surtout signalée dans un grand nombre de minerais de fer appartenant à des groupes métallo-géniques divers, et nous l'avons déjà constatée plus haut dans les ségrégations de Taberg (Suède). On a reconnu le même métal dans les minerais d'altérations superficielles de Temnitz et Myslovitz (Haute Silésie).

Les minerais de *Mazenay* (Saône-et-Loire) ont donné lieu à une industrie extractive par le procédé Osmond et Witz, dans lequel l'opération métallurgique continue une concentration du vanadium, déjà opérée en plusieurs temps par des réactions naturelles.

Au début, on peut admettre que le vanadium existait dans les roches primitives de la région (gneiss granulitiques). Il a dû être ainsi introduit dans les minerais de fer de Mazenay, qu'une faible couche de terrains détritiques (arkose triasique) de 17 m. d'épaisseur sépare seule de ces gneiss. Ces minerais en tiennent quelques dix millièmes.

Quand on traite le minerai de Mazenay au haut fourneau, l'acide vanadique est réduit comme l'acide phosphorique ; le vanadium isolé se combine avec le fer et passe, à peu près entièrement, dans la fonte, en se concentrant à la dose de 1 à 3 millièmes.

Lorsqu'on transforme ensuite cette fonte en acier, le vanadium suit le

¹ La roscoélite avait d'abord été découverte comme une rareté dans des porphyres de Californie au contact de filons aurifères (Mine Granite Creek, etc.).

phosphore dans la scorie et y arrive couramment à un centième. On peut même augmenter cette teneur par un fractionnement de l'opération après la décarburation; le laitier de cette première partie du travail retient alors tout le vanadium.

Ce sont ces scories que l'on concasse et abandonne au contact d'une faible quantité d'acide chlorhydrique qui dissout le vanadium à l'état de tétr oxyde. Cette dissolution peut être utilisée telle quelle. Si on veut l'enrichir, on neutralise et on ajoute un acétate alcalin; il se précipite alors du phosphate de tétr oxyde de vanadium.

Les minerais traités au Creusot auraient pu ainsi fournir 60 t. de vanadium; mais ce traitement a été laissé de côté en 1885 quand on a abandonné un moment le vanadium dans la teinture au noir d'aniline.

3° ASSOCIATION DU VANADIUM AVEC LE CUIVRE ET LE COBALT

Un assez grand nombre de sédiments, dans la période permo-triasique européenne, mais aussi dans les périodes plus anciennes qui semblent ailleurs avoir donné lieu à des dépôts assimilables, renferment du vanadium associé au cuivre. L'association comprend, d'ordinaire, aussi du cobalt et le rapprochement de ces métaux, généralement les mêmes, tandis que le plomb et le zinc sont rares, est certainement un argument en faveur de la précipitation directe par voie sédimentaire. Il est à remarquer que la précipitation du cuivre comporte là, presque toujours, une réduction par des matières hydrocarburées.

Dès 1839, on s'aperçut que le permien de l'*Oural* était caractérisé par la diffusion du vanadium, avec concentration sur certains points, tels que le grès de Voskressensk, où la teneur en vanadium atteint 4 p. 100.

Puis, en 1841, Kersten signala le vanadium dans les schistes cuivreux du *Mansfeld*, où nous avons également indiqué la présence du cobalt, soit dans les couches mêmes, soit dans les failles ou rücken qui les traversent¹.

En 1867, Roscoe retrouva, dans les grès cuprifères triasiques du *Cheshire*, près d'Alderley Edge, une quantité de vanadium suffisante pour permettre son extraction industrielle, connexe de celle du cuivre et du cobalt associés. Une extraction analogue fut recommencée dans la suite sur les mêmes terrains à Mottram Saint Andrews et à Harm Hill, près Shrewsbury.

Enfin les cuivres natifs du *Lac Supérieur*, qui remplissent les interstices de conglomérats huroniens, présentent parfois un enduit terreux d'acide vanadique.

4° HOUILLES ET ASPHALTITES VANADIÉS

Les matières hydrocarburées ont, comme nous l'avons annoncé plus haut, déterminé une concentration fréquente du vanadium, sur laquelle il y a lieu d'appeler tout spécialement l'attention. Tantôt il semble qu'on ait

¹ Voir tome 2. pages 599 et 600.

affaire à des hydrocarbures filoniens, comme nous l'avons vu précédemment à Minasragra (Pérou) et peut-être est-ce aussi le cas des gisements que nous allons signaler à Yauli (Pérou), dans l'Oklahoma, l'Arkansas, etc. Mais, ailleurs, on a certainement affaire à des sédiments charbonneux vanadiés.

Beaucoup de végétaux et un certain nombre de houilles renferment, dans leurs cendres, des quantités appréciables de vanadium. Ce qui doit tenir à une concentration opérée par l'influence des matières organiques sur des traces de vanadium contenues dans les terrains où ces végétaux ont pris racine. Il est possible que la concentration fréquente du vanadium dans les sédiments cuprifères, où le cuivre paraît avoir été si souvent précipité par des matières hydrocarburées, tienne à une réaction semblable.

Yauli (Pérou). — On connaît, depuis 1890, au Pérou, un gisement fort intéressant situé à *Yauli*, province de Tarma, près du lac Llacsacocha, à 4 200 m. d'altitude entre Lima et l'Oroya. Ce gisement a été généralement décrit comme formé de houille anthraciteuse ou asphaltite. Les cendres de cette substance tiennent 5 à 30 p. 100 d'acide vanadique et on a essayé de les brûler pour recueillir ce vanadium. D'après de nouvelles descriptions, ce seraient peut-être des filons d'un hydrocarbure vanadié traversant les sédiments crétacés¹. Cependant il est question aussi de plusieurs bancs ayant, les uns 0,60 m., les autres jusqu'à 3 m. d'épaisseur et recoupés par de nombreuses failles.

Diverses mines ont été ouvertes récemment à Matucan, Casalapca, Huari, Huancayo².

Etats-Unis. — De même, dans l'*Oklahoma* (Monts Washita), aux Etats-Unis, il existe des veines d'une substance charbonneuse, dite asphaltite, à 80 p. 100 de carbone, brûlant avec une flamme longue et fumeuse et donnant 0,85 p. 100 de cendres, qui elles-mêmes tiennent 14 p. 100 de vanadium.

A Mena, dans l'*Arkansas*, des produits semblables donnent 0,65 p. 100 de cendres à 15 p. 100 de vanadium.

Dans le *Nevada*, à Palisade, on retrouve une veine d'1 m. contenant aussi de l'asphaltite vanadié.

San Raphaël (Argentine). — On a également décrit et essayé d'exploiter la « houille » de *San Raphaël*, province de Mendoza, en Argentine, comme donnant 0,6 p. 100 de cendres, dont la teneur en vanadium est de 38 p. 100 avec 0,71 d'acide phosphorique. C'est ce qu'on appelle la rafaélite, dont la teneur est de 2 kg. d'acide vanadique par tonne.

¹ Peut-être alors faudrait-il les rapprocher, comme les gisements des Etats-Unis décrits plus loin, des filons de gilsonite de l'Utah étudiés tome 1, p. 601.

² *La Nature*. Inform., 1759, 9 févr. 1907.

CHAPITRE XXI

ARSENIC

As = 74,96

I. — USAGES, STATISTIQUE ET COMMERCE

Usages. — On emploie de plus en plus de composés arsénicaux (orpin, arséniate de plomb, de sodium, etc.), comme insecticides pour préserver les arbres fruitiers, les vignobles, les plantations de caoutchouc.

Plus généralement, l'arsenic, déjà connu des alchimistes grecs, est utilisé, sous quatre formes principales, comme produit vénéneux, matière colorante ou mordante : 1° arsenic métallique ; 2° anhydride arsénieux ; 3° anhydride arsénique ; 4° composés arsénicaux (couleurs, insecticides et médicaments).

1° L'*arsenic*, réduit en poudre, constitue le produit connu dans le commerce sous le nom de poudre aux mouches qui, en présence de l'eau, s'oxyde superficiellement et donne de l'acide arsénieux. Il entre dans la composition de quelques verres étrangers et de certains alliages, tels que le tain des miroirs de télescope ou le plomb de chasse, auquel l'arsenic permet de se séparer plus facilement en grains dans la coulée, etc.

2° L'*anhydride arsénieux*, qui est adopté dans les verreries pour obtenir certaines apparences porcelaniques, sert pour la fabrication du vert de Scheele (arsénite de cuivre), du vert de Schweinfurt, du réalgar, pour le mordantage des indiennes. On l'emploie pour chauler les blés, pour empoisonner les rats, etc. Il entre dans le savon de Baccœur, au moyen duquel les naturalistes conservent les animaux empaillés.

3° L'*anhydride arsénique* est utilisé en assez grande quantité dans l'impression des toiles peintes pour faire des enlevages et surtout pour la fabrication du rouge d'aniline. A faible dose, il est employé en remède contre l'asthme ; à plus haute dose, il devient un poison violent.

4° Toute une série de produits arsénicaux ont été employés pour la fabrication des *couleurs* jaunes et vertes : l'or piment ou or jaune ; le réalgar ou sulfure rouge ; l'arséniate de cuivre (vert Mitis, vert de Scheele, vert Véronèse, etc.). Ces couleurs ont l'inconvénient d'être vénéneuses et les verts d'arsenic ont été défendus dans l'industrie des papiers peints en divers pays (Prusse, Suède, etc.). Cependant les arséniate de cuivre, de plomb et de sodium sont encore l'objet d'une consommation importante (peintures marines, etc.).

Le réalgar est également employé en pyrotechnique et pour la peinture. L'arséniate de sodium monosodique sert dans l'impression des tissus et comme insecticide.

Enfin la *pharmacie* emploie un nombre considérable de produits arsénicaux (cacodylates, etc.) correspondant, soit au rôle important que ce corps paraît jouer dans l'activité organique, soit à ses propriétés antimicrobiennes.

La liqueur de Fowler a pour base l'arsénite de potassium.

L'acide arsénique fournit également l'arséniate de sodium (liqueur de Paerson), l'arséniate de quinine, celui d'ammoniaque, etc.

Par contre, dans une foule de cas, l'arsenic est considéré comme une gêne et non comme un produit utile. C'est ainsi que sa présence dans les pyrites diminue fortement la valeur du soufre contenu.

Statistique et commerce. — La consommation de produits arsénicaux dans le monde a été évaluée, très hypothétiquement, aux chiffres suivants pour 1907 : arséniate de sodium 10 000 t. ; acéto-arsénite de cuivre 7 000 t. ; acide arsénieux 6 500 t. ; arséniate de plomb 5 250 t. ; réalgar 2 500 t. ; arsénite de cuivre 1 500 t. ; or piment 1 240 t. ; arsénite de potassium 495 t. ; arsenic métallique 215 t. ; anhydride arsénique 10 t. ; autres produits 5 t. ; au total 33 735 t.

La statistique américaine évalue (également sans grande précision) la production d'arsenic dans le monde (1907) aux chiffres suivants : France, 7 900 t. ; Allemagne, 2 900 t. ; Espagne, 2 400 t. ; Angleterre, 1 500 t. ; Portugal, 1 300 t. ; États-Unis, 900 t. ; Canada 300 t. : au total, avec quelques producteurs secondaires, environ 21 000 t.

En 1910, le Canada est monté à 1 363 t. ; l'Angleterre à 2 878 t. ; les États-Unis à 1 203 t. La production de l'Allemagne est restée la même. En revanche, la France est tombée, en 1909, à 2 141 t.

Les minerais pratiques d'arsenic sont, comme nous allons le voir : d'abord le mispickel, puis le réalgar et les sulfoarséniures complexes, dont le grillage donne, comme sous-produits, des poussières arsénicales.

Parmi les pays cités plus haut, la *France*, dont la production varie, comme nous venons de le voir, dans de fortes proportions, a trois mines de mispickel, deux dans l'Aude, une dans le Puy-de-Dôme et des exploitations récentes de réalgar en Corse. Le développement des mines aurifères, qui portent sur des mispickels à la Bellière, au Châtelet, à Bonnac, etc., accroît actuellement la production d'arsenic. En 1910, la Bellière a produit 274 t. d'acide arsénieux (pour 8 500 t. de mispickel).

En *Allemagne*, l'arsenic vient surtout des minerais complexes de la Saxe et des mispickels de Reichenstein en Silésie. Sa production paraît assez constante.

L'*Espagne* a une mine de mispickel principale : la Carballino Gold and Arsenic mines Co, qui exploite un mispickel aurifère dans la province d'Orense. On cite également la Castro del Rey dans la même région N.-W. de l'Espagne.

En *Angleterre*, la production, alimentée par les mines d'étain du Cornwall, varie dans de fortes proportions : 950 t. de mispickel et 2 200 t. d'arsenic en 1910 contre 13 400 t. d'arsenic sous les deux formes en 1899.

Aux *États-Unis*, les principaux producteurs sont les usines Puget d'Everett (Washington et Midvale (Utah), puis diverses usines à cuivre comme l'Anaconda (Washoe), les fonderies de Salt Lake City (Utah), etc. Des mines situées à Rewald (Virginia), à Wellsville (New-York, etc.) ont cessé de produire. Une seule mine, aux États-Unis, travaille exclusivement pour arsenic, près de Carmel, comté de Putnam (New-York), à 80 km. Nord de New-York. En 1910, les États-Unis ont produit 1 330 t. d'acide arsénieux et en ont importé 3 690 t.

Au *Portugal*, il n'y a qu'une seule mine de mispickel à Pintor, près Nogueira do Cravo (Aveiro).

Enfin, au *Canada*, la production vient tout entière de Sudbury et de Cobalt dans l'Ontario, notamment de la Canadian Copper C^r de Copper Cliff, de la Coniagas Reduction C^r et de la Deloro.

Au *Mexique*, la C^{ie} de Mapimi (Durango) et celles de Peñoles produisent également des poussières arsenicales.

Le cours de l'arsenic est très variable. En 1901, il valait environ 0,30 fr. le kg. Au début de 1907, il atteignait 0,80 fr. En 1908, il a varié de 0,50 fr. à 0,30. En 1910, il est descendu de 0,30 fr. à 0,25.

II. — MÉTALLOGÉNIE

Minerais. — L'arsenic est un corps extrêmement répandu dans la nature. On en trouve des traces dans la plupart des terrains et des roches. Il passe de là dans les végétaux, puis dans les animaux, où, d'après Armand Gautier, il est probablement lié à quelques matières spécifiques de la nature des nucléones et des ferments. Son rôle dans l'activité organique peut être comparé en petit à celui du phosphore. Pour la même raison, on en constate l'existence dans beaucoup d'eaux minérales et dans la mer. Sa diffusion dans les pyrites entraîne sa présence dans une foule de produits fabriqués, pour la préparation desquels est intervenu à un moment quelconque l'acide sulfurique.

Ses minerais sont, ou des combinaisons avec le soufre, telles que le *réalgar* $\text{As}^2 \text{S}^2$ à 70 p. 100 d'arsenic et l'*or piment* $\text{As}^2 \text{S}^3$ à 61 p. 100, ou des combinaisons semblables avec l'antimoine comme l'*allemontite* Sb As^3 , ou des arséniures métalliques, ou des sulfo-arséniures complexes.

Parmi les arséniures, on peut citer : la *nickéline* Ni As , la *saltine* Co As^2 , la *domeykite* $\text{Cu}^6 \text{As}^2$, la *lœllingite* Fe As^2 , la *leucopyrite* $\text{Fe}^2 \text{As}^3$; parmi les arsenio-sulfures, le *mispickel* Fe As S , la *cobaltine* Co As S , la *tennantite* (cuivre gris), $4(\text{Cu As S}^2) + 5 \text{Cu}^2 \text{S}$, l'*enargite* $\text{Cu}^3 \text{As S}^4$, l'*argent rouge arsenical* ou *proustite* $\text{Ag}^3 \text{As S}^3$, la *dufrénoysite* $\text{Pb}^2 \text{As}^2 \text{S}^5$,

On trouve, en outre, comme produits d'altération, l'*arsenic natif*¹ très rare, l'*arsénolite* $\text{As}^2 \text{O}^3$ et des arsénates de plomb, zinc, cuivre, etc. (*mimétèse*, *adamine*, *olivénite*).

La plus grande partie de l'arsenic utilisée dans l'industrie provient, comme produit secondaire, des chambres de condensation placées à la

¹ Cet arsenic natif contient, presque toujours, au moins 1,5 p. 100 d'antimoine (9,18 p. 100 à Ophir, Californie), parfois des proportions sensibles de bismuth et de nickel, généralement un peu de soufre. Voir p. 736 à Freiberg, Sainte-Marie-aux-Mines, Chalançhes, etc.

suite des fourneaux où l'on grille les arséniosulfures de cobalt et de nickel, les pyrites arsenicales de cuivre, l'argent arsénio-sulfuré et divers autres minerais : ce qui donne de l'anhydride arsénieux, réduit ensuite par le charbon.

Cependant, il existe, dans quelques contrées, notamment en Angleterre (Cornwall), en Bohême (Joachimsthal), à Freiberg et à Altenberg (Saxe), à Reichenstein (Silésie), à Putnam (N.-Y.), etc., des établissements, pour lesquels les composés arsénieux sont le véritable et l'unique but de la fabrication. Le minerai d'arsenic est, dans ce cas, le mispickel, FeAsS , dont la teneur théorique est de 46 p. 100.

Ailleurs on a exploité aussi la leucopyrite (Reichenstein) ou la lœllingite (Karezas).

L'énumération précédente montre l'arsenic venant se placer à côté du soufre et de l'antimoine¹ et susceptible, comme eux, de former des combinaisons avec les mêmes métaux, spécialement avec le fer, le nickel, le cobalt, le cuivre, l'argent, accessoirement le plomb.

Chimiquement, on le rapproche ordinairement du phosphore et de l'azote; mais son rôle métallogénique est différent. Les arséniates ne sont que des produits d'altération et le phosphore n'entre pas naturellement dans les combinaisons sulfurées qui sont la caractéristique de l'arsenic.

Les affinités de l'arsenic pour le soufre font que ce corps est essentiellement un produit de filon, ou tout au moins de départ volatil, tandis que la place naturelle du phosphore est à l'état d'acide phosphorique dans la scorie silicatée : son rôle filonien se restreignant au groupe stannifère, qui tient encore du mode de cristallisation pétrographique autant que du mode filonien et où il est, d'ailleurs, très subordonné.

Le mispickel (et c'est le seul rapprochement métallogénique que l'on puisse faire entre l'arsenic et le phosphore) apparaît déjà comme un élément fréquent dans les filons d'étain, de tungstène ou d'or, liés à la granulitisation et au métamorphisme de profondeur. Un assez grand nombre de mispickels sont aurifères et exploités à ce titre comme minerais d'or.

Mais, en outre, les arséniures et arsénio-sulfures, dont nous avons donné l'énumération, entrent dans toute une série de filons complexes offrant les types filoniens les plus divers et l'on peut même, comme terme extrême superficiel, opposé à l'étain, remarquer la présence du réalgar en association avec le mercure (Oviedo, etc.) et son dépôt dans des sources thermales actuelles (Saint-Nectaire, etc.).

On peut envisager, pour l'arsenic, les types de gisements suivants :

1° Filons-couches de mispickel, parfois aurifère, cuprifère ou nickélique, dans les schistes archéens.

2° Mispickel associé à la cassitérite ou au wolfram dans des filons proprement dits et exploité comme sous-produit (Cornwall, etc).

3° Sulfo-arséniures complexes de nickel, cobalt, cuivre, plomb, argent, etc.

4° Réalgar et or piment (parfois produits par l'altération du mispickel)

¹ L'arsenic est isomorphe avec le tellure et l'antimoine. On l'a cru également, mais à tort, isomorphe avec le soufre.

dans les filons de mercure, dans quelques autres filons récents à remplissages de sulfures complexes et dans les sources thermales actuelles.

La plupart des gisements d'où on extrait l'arsenic, devant être décrits dans d'autres chapitres, ne seront ici que l'objet d'un bref rappel.

1° FILONS-COUCHES DE MISPICKEL

Le mispickel, comme la pyrite, forme constamment des filons-couches et imprégnations diffuses liées au métamorphisme de profondeur dans les terrains à facies archéen. Ces gisements ne sont utilisés que lorsque leur épaisseur est suffisante pour permettre une exploitation fructueuse en vue de l'arsenic seul, ou lorsque leur teneur en or amène à en extraire l'arsenic comme sous-produit; mais, en outre, le mispickel est très fréquemment disséminé dans les mêmes conditions en veines plus minces actuellement inutilisables.

Les mispickels aurifères, étant, comme minerais d'or, d'un traitement métallurgique difficile, ont été souvent négligés autrefois et sont probablement appelés, avec l'épuisement de gîtes plus avantageux, à être repris désormais avec une activité croissante.

Le développement du mispickel dans de telles conditions semble, comme nous venons de le dire, se rattacher au métamorphisme de profondeur, qui, lui-même, a un rapport direct avec la mise en place des magmas granitiques. Le mispickel peut donc être considéré comme y émanant du granite et comme formant ainsi un premier stade d'un départ que nous allons retrouver sous une autre forme dans les filons de mispickel stannifères, eux-mêmes liés aux granulites (type 2°).

Scandinavie. — En Norvège, on trouve des pyrites arsenicales mélangées avec du cobalt à Skuterud¹. En Suède, il existe aussi des mispickels aux environs de Falun, près de Norköping et Nyköping, sur la côte de la Baltique et, plus au Sud, sur la même côte, à Gladhammar, où ces mispickels sont associés avec des minerais cobaltifères.

Reichenstein (Silésie)². — A Reichenstein, sur le flanc Nord du Riesengebirge, on a, le long de serpentines encaissées dans les micaschistes avec lits de dolomie, un certain nombre de gisements formant des lentilles interstratifiées : tels que le Pingenzug, connu sur 1 200 m. de long, 35 m. de puissance maxima, 180 m. de profondeur. Le minerai est surtout de la leucopyrite avec du mispickel, tous deux légèrement aurifères.

On a d'abord rattaché ce gisement à la ségrégation des serpentines, puis, avec Wienecke, à un métamorphisme d'origine granitique qui a développé de la tourmaline, de l'apatite, de la fluorine, etc., et, dans la

¹ Voir plus loin, tome 2, page 613 (Skuterud), p. 614 (Gladhammar).

² 1870. GÜTLER. *Ueber die Form. des Arsenikal Kieses zu Reichenstein und dessen Goldgehalt* (Inaug. Diss. Breslau). — 1879. HARE. *Die Serpentinmasse von Reichenstein und die darin vorkom. Mineralien* (Inaug. Diss. Breslau). — 1896. FAULHABER. *Die ehemalg Schles. Goldprod.* (Inaug. Diss.). — 1899, Z. f. p. G., pr. 147). — 1907. WIENECKE. *Ueber die Arseniklagerst. von Reichenstein* (Z. f. pr. G., p. 273). — Cf. 1901. BERGHÄNEL. *Das alte Arsenikwerk Rothgülden im Kronlande Salzburg* (Grazer Montan Zg., p. 311-314).

dolomie, du diopside. Ce mispickel se rattache ainsi au groupe stan-nifère étudié plus loin.

La mine, exploitée d'abord pour or dès 1270, est aujourd'hui la principale mine d'arsenic en Allemagne.

Alpes. — Dans les Alpes, les gisements d'or de Pestarena sur le flanc italien du Mont Rose comprennent des mispickels aurifères formant filons-couches dans les gneiss, que nous décrirons plus loin.

États-Unis¹. — Dans le Comté de Putnam (New-York) on exploite, au milieu des gneiss, deux bancs interstratifiés de mispickel ayant de 3 à 5 m. de large, d'où l'on extrait un minerai brut à 10-12 p. 100 d'arsenic.

Terre-Neuve. — On a signalé, dans ces conditions, d'importants gisements de mispickel légèrement aurifère à Terre-Neuve, à Moreton's Harbor, dans la baie Notre-Dame.

Algérie. — Nous avons cité plus haut les leucopyrites (Fe^2As^3) de Reichenstein en Silésie. On peut en rapprocher le gisement de *Karézas*, près de Mokta-el-Hadid, à 145 km. S.-W. de Bône, où l'on trouve, dans une zone d'amphibolites des terrains cristallophylliens, une lentille, non pas de mispickel, mais de lœllingite (Fe As^2). La teneur en arsenic est de près de 40 p. 100.

On a trouvé de même à *Kef-Oum-Thébol* de la lœllingite renfermant des filaments d'argent natif et les hématites de Tabarca, en Tunisie, contiennent assez d'arsenic pour avoir été rendues par là inutilisables². Mais les deux derniers cas, que nous citons ici pour leur rapprochement géographique, correspondent à des filons tertiaires d'un type tout différent.

2° MISPICKELS ASSOCIÉS A L'ÉTAIN, AU TUNGSTÈNE ET A L'OR

Cornwall et Devon. — Nous avons, à l'occasion de l'étain et du tungstène, signalé maints exemples de ce genre. Industriellement, le seul groupe important est celui du *Devon* et du *Cornwall*, dont la production, autrefois la première du monde, a beaucoup décliné.

Cette production se décompose en deux parties : mispickels grillés sur la mine ayant donné jusqu'à 8 000 t. d'arsenic en 1885 pour tomber à 2 200 t. en 1910, et mispickels vendus, qui dépassaient 10 000 t. de 1897 à 1900, mais sont réduits à 180 t. en 1909 et 950 t. en 1910.

On peut citer : en Cornwall, South Wheal Crofty, East Pool et Carn Brea comme fournissant chacune environ 500 t. d'arsenic.

Bohême. — A Joachimsthal, on traite de même des mispickels, avec lesquels on rencontre parfois de l'acide arsénieux.

France. — Des mispickels aurifères ont été récemment repris pour or à la Bellière (Maine-et-Loire), à Bonnac (Puy-de-Dôme)³, au Châtelet (Creuse), dans l'Aude, etc.

¹ *Min. Ind. for 1907*, p. 66.

² L. DE LAUNAY. *Rich. min. de l'Afrique*, p. 155 et bibl. Voir plus loin, t. 2, p. 361.

³ Coll. Éc. d. M. 1530.

Pintor (Portugal). — A Pintor, province de Beira (au Portugal), près de S. Joao de Madeira, on exploite, dans les schistes cambriens, près du granite, des filons de mispickel, qui se rattachent à tout un groupe de filons de tungstène et d'étain. Ces minerais rendent, en moyenne, 2,8 p. 100 d'anhydride arsénieux, et l'on a produit, en 1910, 974 t. de cet anhydride valant 214.000 f.

3° GISEMENTS COMPLEXES ARSENICAUX DE PLOMB, CUIVRE, ETC.

L'un des meilleurs exemples de ce genre est fourni par l'*Erzgebirge Saxon* (Freiberg, Altenberg, etc). A Freiberg, on rencontre de l'arsenic natif en masses mamelonnées, formées de couches concentriques et contenant plus de 4 p. 100 d'argent, comme les lœllingites signalées plus haut à Kef-Oum-Théboul. Le sulfure d'arsenic et le mispickel se présentent en divers points des filons. Mais surtout les divers minerais sulfurés renferment fréquemment des traces d'arsenic, qui, recueillies dans les conduites de fumées, deviennent utilisables.

De même, on trouve un peu de mispickel et d'acide arsénieux dans les mines de plomb du district du *Harz*.

En Alsace, les anciennes mines de *Sainte-Marie-aux-Mines*¹ ont présenté, dans leurs parties hautes, de remarquables blocs d'arsenic natif pesant plusieurs kg., avec de l'argent natif, de la galène, de la proustite, de la pyrargyrite, de la cobaltite, du mispickel : par conséquent, dans un gisement cobalto-argentifère.

Dans des conditions identiques, sur un filon cobalto-argentifère des *Chalanches*, dans l'Isère, on a trouvé de l'arsenic natif avec de l'allemonite.

Ailleurs les usines qui fondent les minerais de cuivre sont fréquemment productrices d'arsenic. Il suffira de rappeler le cas du district de *Sudbury*, au Canada, des filons de l'*Anaconda*, au Montana, etc. Les usines de *Salt Lake City* dans l'Utah produisent également un peu d'arsenic.

4° RÉALGAR ET OR PIMENT

Le réalgar et l'or piment, qui se développent, comme nous le dirons en terminant, dans les sources thermales et les solfatares, apparaissent assez fréquemment dans des filons métallifères, notamment dans des filons tertiaires, où il leur arrive d'accompagner le mercure, l'or et l'argent, mais quelquefois aussi dans des filons mercuriels plus anciens.

Dans bien des cas, et en particulier dans certains filons complexes de stibine et réalgar, on a la preuve que les sulfures d'arsenic sont seulement l'altération secondaire d'un mispickel profond. Ils peuvent être aurifères comme les mispickels dont ils proviennent. Ailleurs, on est amené à croire que les sulfures ont été un dépôt originel, formé dans les conditions superficielles de nos eaux thermales. Citons, dans les *Asturies*,

¹ LACROIX. *Min. de la France*, t. 2, p. 382, 384. — Coll. Éc. d. M. 1259. 2926.

le gîte de mercure d'Oviedo, où du cinabre et du réalgar tapissent les fissures d'un calcaire carbonifère.

En *Transylvanie*, on a trouvé une veine de réalgar de 0,30 m. de large au milieu d'un calcaire dolomitique. Près de Nagyag, le réalgar accompagne les minerais d'or et d'argent. Il existe, de même, près de Felsőbanya.

En même temps que le réalgar, l'orpiment se présente dans toutes ces mines de Transylvanie : parfois sous forme de masses foliacées ; ailleurs, comme à Tayoba, en groupements de cristaux au milieu de l'argile. Ce réalgar s'accompagne souvent de stibine.

En *Macédoine*, nous décrirons¹ le gisement d'Allchar, où le réalgar et l'orpiment, associés à la stibine dans un calcaire sous un toit de mica-schistes, proviennent évidemment de l'altération du mispickel.

En *Corse*, on connaît des masses de réalgar avec orpiment et calcite dans les schistes lustrés de Matra et au-dessous de Porta d'Am-pugnani². Un de ces gisements de réalgar, exploité par la Société « L'Arsenic », a, paraît-il, avant d'être concédé, produit, en trois ans, de 1908 à 1911, pour 225.000 fr. de produits arsenicaux.

En *Arménie*³, on connaît de même de l'orpiment près de Bitlis.

En *Nouvelle-Calédonie*, près Nakety, des filons de stibine contiennent un peu de réalgar.

En Chine, dans le *Yunnan*, les filons de réalgar sont très développés au Sud de Ta-li et produisent actuellement une centaine de tonnes de minerai pur. L'orpiment provient de Mong-hoa (Ting), ville située à 40 km. au Sud de Tchao-tchéou, au Sud de Tali, où l'on en extrait environ 200 t. de minerai pur par an, valant 15 fr. les 100 kg.

Les Chinois utilisent le réalgar pour sculpter des bibelots.

Le district de Kumaon, dans l'*Himalaya*, produit également un peu de réalgar, qui est vendu dans les bazars du Nord de l'Inde.

On peut mentionner encore à ce propos le dépôt relativement fréquent du sulfure d'arsenic dans des sources thermales actuelles, en particulier dans les geysers du *Yellowstone Park* et à *Saint-Nectaire* dans le Puy-de-Dôme, avec de l'opale.

Le réalgar et l'orpiment accompagnent également le soufre dans certains produits de sublimation de solfatares, à *Pouzzoles*, près de Naples, à *la Guadeloupe*, etc. L'incendie des houillères en produit d'ailleurs des échantillons.

¹ Tome 1, p. 774.

² LACROIX. *Min. de la France*, t. 2, p. 442. — Coll. *Éc. d. M.*, 2939.

³ L. DE LAUNAY. *Rich. min. de l'Asie*, p. 654, 761, 771, 6054.

CHAPITRE XXII

ANTIMOINE

Sb = 120,2.

I. — USAGES, STATISTIQUE ET COMMERCE

Historique. — Le sulfure d'antimoine, ou stibine, a été connu en Orient depuis les temps les plus reculés¹. Dioscorides l'a mentionné sous le nom de stimmi et Pline de stibium, en indiquant l'usage qu'en faisaient les femmes d'Asie pour se noircir les sourcils. Au xv^e siècle, Basile Valentin cite le verre d'antimoine obtenu par la fusion de l'antimoine naturel dans des vases de terre, le soufre doré, le kermès, le beurre d'antimoine. Dans le *Currus triumphalis antimonii*, à l'époque de la Renaissance, on trouve l'indication du vin stibié et de l'émétique. On avait, dès lors, remarqué que l'antimoine donnait de bons effets dans la nourriture des animaux à l'engrais. On en abusa tellement en médecine qu'en 1566, sur une décision de la Faculté de Paris, le Parlement en proscrivit l'usage, et cette défense ne fut levée qu'un siècle après, en 1637, époque où le vin émétique fut inscrit au Codex.

Usages. — Aujourd'hui l'antimoine est utilisé, soit sous forme d'alliage, soit comme base de certains produits chimiques et pharmaceutiques.

Alliages. — L'antimoine, en s'alliant à la plupart des métaux, leur donne de la dureté. L'alliage des caractères d'imprimerie consomme une assez forte proportion de ce métal; en voici quelques compositions :

	Sb	Bis	Pb	Etain.
Alliage pour caractères d'imprimerie. }	20,00	»	30,00	»
	27,77	22,23	50,00	»
	5,82	29,58	65,10	»
	33,34	»	66,66	»
Alliage pour planches stéréotypes . . }	14,29	»	85,71	»
	15,00	15,00	70,00	»
	12,00	»	83,00	5

Allié au plomb, l'antimoine le rend susceptible d'être laminé en feuilles minces, à la condition qu'il ne contienne pas d'arsenic. Ces deux usages, caractères d'imprimerie et plomb antimonieux, sont les principaux. On

¹ Berthelot a fait cette observation bien curieuse (Rev. Archéol., 1887, 3^e, t. 9), qu'un vase, trouvé à Tello en Chaldée par de Sarzec, était en antimoine métallique fondu.

peut encore citer les coussinets de machines, le tréfilage du fer, la robinetterie, les piles et l'éclairage électrique, les plaques d'accumulateurs, la bijouterie vulgaire, le métal antifricition, le métal anglais, etc.

Le métal *Britannic* est un alliage de 10 d'antimoine et 90 d'étain. L'antimoine entre également dans la composition du *Pewter* anglais, qui sert à faire des brocs et des vases à boire (89 d'étain, 7,40 d'antimoine, 1,80 de cuivre, 1,80 de bismuth); dans celle du *métal de la Reine*; du *métal d'Alger*; de l'*alliage de Réaumur* (70 d'antimoine et 30 de fer); de l'*alliage de Sérullas*, obtenu en fondant 6 parties d'émétique (tartrate double de potassium et d'antimoine) avec une partie d'azotate de potassium et utilisé pour la préparation des radicaux organo-métalliques de l'antimoine. On fabrique enfin un bronze d'antimoine, qui a donné, en Angleterre, de bons résultats pour les coussinets de wagons, etc.

Pharmacie. — En médecine, on emploie le kermès (mélange de sulfure d'antimoine et de pyro-antimoniate de sodium), le sulfo-antimoniate, l'émétique, le trichlorure (Sb Cl_3) ou beurre d'antimoine, la poudre d'algaroth ($\text{SbO}^2 \text{Cl}$), l'antimoniate de quinine. On désigne, d'une façon générale, tous ces remèdes sous le nom d'antimonioux.

Industries chimiques. — L'anhydride antimonieux (Sb^2O^3) sert, sous le nom de beurre d'antimoine, à bronzer le cuivre et les armes pour les préserver de l'oxydation; il se produit, en effet, par l'action du fer ou du cuivre sur le chlorure, un dépôt superficiel d'antimoine peu altérable.

L'oxyde d'antimoine a pris également une place importante dans l'industrie des matières colorantes depuis la campagne menée au nom de l'hygiène contre le blanc de céruse, et l'on utilise aussi la combinaison de cet oxyde avec le sulfite de baryum ou de calcium. La céramique en emploie également un peu pour remplacer l'oxyde d'étain.

L'oxysulfure d'antimoine ($\text{SbS}^2 \text{O}$), entre, sous le nom de vermillon d'antimoine, dans la fabrication des toiles et des papiers; c'est une couleur qui couvre bien, se mêle parfaitement à la céruse et a l'avantage d'être inaltérable à l'air, à la lumière, aux émanations sulfureuses, etc.

Vers 1909, on a organisé à Brioude un nouveau procédé de traitement des minerais d'antimoine qui consiste à volatiliser l'antimoine en fondant le minerai avec du coke dans un four à cuve, recueillant les fumées d'oxyde et obtenant une scorie où se concentrent les métaux associés. La méthode a le double avantage de s'appliquer à tous les genres de minerais et de donner un produit de qualité supérieure. Une usine, pouvant fournir 1 000 t. de régule par an, ne coûte pas plus de 200 000 francs. La perte ne dépasse pas 7 à 10 p. 100.

Ensuite, par addition de carbonate de baryum ou de carbonate de calcium, dans la liqueur chaude contenant l'oxyde d'antimoine en dissolution, on obtient une excellente matière colorante, vendue à peu près le même prix que l'oxyde d'antimoine. La même méthode permet d'obtenir le jaune d'antimoine et les autres matières colorantes antimonieuses.

L'antimoine lui-même, en poudre très fine, comme celui qu'on obtient par précipitation d'un de ses sels par le zinc ou le fer, est connu dans l'industrie sous le nom de noir de fer; il sert à bronzer les métaux et à donner aux statuettes de plâtre un aspect métallique. On emploie également des dépôts galvaniques d'antimoine. Mélangé au magnésium, il est

utilisé comme poudre-lumière en photographie. Il sert également en pyrotechnie.

Le jaune de Naples est un antimoine basique de plomb préparé en fondant 1 partie d'antimoine avec 1 partie de plomb, 3 de salpêtre, 6 de sel marin, pulvérisant le produit et lavant à l'eau chaude. Le jaune minéral de Mérimée et le jaune Pinard sont des produits de composition analogue.

Statistique. — La production d'antimoine métallique dans le monde peut être évaluée approximativement comme suit en 1907 :

TABLEAU 33. — PRODUCTION MONDIALE D'ANTIMOINE MÉTAL

PAYS PRODUCTEURS	1907	1908	1909
Chine	6 000	9 000	7 950
France (régule, oxyde et sulfure).	3 950	3 850	5 444
Etats-Unis	2 608	3 112	2 100
Mexique	1 163	883	»
Hongrie	841	670	695
Italie.	610	345	550
Japon	248	198	20
Autriche.	207	162	0
TOTAL., avec divers, environ.	15 000	19 500	18 000

Ces chiffres ne correspondent pas à la production minière, dont les produits subissent des transports d'un pays à un autre; mais, par contre, ils font entrer en ligne de compte l'antimoine obtenu comme sous-produit métallurgique, notamment dans le traitement des plombs antimonieux qui joue un grand rôle aux États-Unis.

La production des minerais (stibines et oxydes d'antimoine) est estimée comme suit, en minerais de teneur très variable :

TABLEAU 34. — PRODUCTION MONDIALE DE MINERAIS D'ANTIMOINE

PAYS PRODUCTEURS D'ANTIMOINE	1900	1907	1908	1909
France et Algérie.	7 963	25 200	26 190	28 160
Mexique	2 313	4 615	4 046	»
N. S. Wales (Minerai et métal).	252	7 000	3 900	»
Italie.	7 609	7 900	2 800	2 100
Asie Mineure environ.	»	2 500	»	»
Hongrie	2 373	2 597	1 600	969
Autriche	201	910	190	450
Etats-Unis	300	190	366	100
Portugal	38	380	76	»
Bolivie.	1 174	571	»	»
Espagne	301	205	124	»
TOTAL (avec divers).	47 000	38 000

Nous allons parcourir successivement ces pays producteurs en signalant à leur occasion un certain nombre de gisements, sur lesquels nous n'avons pas de renseignements géologiques spéciaux.

Parmi les pays que nous venons d'énumérer, *la Chine* alimente surtout le marché américain¹. Ce pays exporte aux États-Unis une assez grande

¹ Voir *The Mineral Industry for 1910*, p. 39.

quantité de régule d'antimoine (1 750 t. en 1907). Les gisements de stibine se trouvent surtout dans le Hounan, accessoirement dans les provinces de Kiangsi, Kouei-tchéou et Sé-tchouan. Les gisements du Hounan se trouvent près de I-Yang, au N.-W. de Toung-ting lake. Les minerais sont amenés et fondus à Chang-cha ; puis le régule est porté à Han-kéou, où on le raffine. La production de 1907 dépassait 3 957 t. de régule et 14 810 t. de minerai, soit 6 à 7 000 t. d'antimoine. En 1908, deux seulement des trois principaux producteurs ont donné 8 302 t. de régule. Au Kouangsi, la production, autrefois importante, est tombée à rien après avoir été monopolisée par le gouvernement.

Il existe également, près de la frontière du Tonkin, dans la région stannifère de Mong-tzé, quelques filons d'antimoine inexploités.

En Europe, la France occupe, pour l'antimoine, une place prépondérante. En 1880, sa production était seulement de 180 t. ; en 1889, de 316 t. (Haute-Loire et Corse). Elle dépasse aujourd'hui 5 000 t. Les principaux centres de production y sont : d'une part, la Lucette (Mayenne), qui a produit, en 1908, 10 000 t. de stibine aurifère ; en 1909, 1 224 t. de régule, 624 t. d'oxyde et 81 t. de sulfure ; de l'autre, le groupe de la Haute-Loire (Brioude) et du Cantal, qui a produit, en 1909, 1 741 t. de régule et 422 t. d'oxyde. Le Cantal figure, en outre, en 1908, pour 851 t. de produits antimonieux ; le Gard, pour 70 t. ; la Lozère, pour 50 t. Il existe, de plus, quelques mines intermittentes dans l'Allier, la Creuse, la Corse, etc.

Les principales fonderies sont : Herrenschildt, au Genest (Mayenne) ; E. Chatillon et V. Géraud, à Brioude (Haute-Loire) ; E. Beau, à Alais (Gard).

Aux *Etats-Unis*, il n'y a pour ainsi dire pas de mine d'antimoine proprement dite ; mais une quantité assez forte d'antimoine est obtenue par le raffinage du plomb. La consommation d'antimoine dans ce pays a été, en 1908, de 6 763 t. ; en 1910, de 6 560 t., dont 2 100 produites dans le pays, comprenant seulement 27 t. de minerais nationaux et le reste extrait de plombs durs. On peut citer l'Utah Antimony Co., dans l'Utah. Dans l'Idaho, à Spokane et Burke (C^{te} de Shoshone) on a produit une certaine quantité de stibines aurifères vendues pour l'or contenu sans tenir compte de l'antimoine. Dans le Nevada, comté de Humboldt, on a exploité autrefois un minerai d'antimoine bismuthifère.

Les raffineurs de plomb de l'Ouest américain produisent une quantité de plomb antimonieux, qui monte à environ 10 000 t. ; il faut ajouter un peu du même alliage obtenu par un procédé de fusion directe de la stibine avec la galène et parfois quelques plombs durs importés du Mexique.

Le *Mexique* a une fonderie d'antimoine à Wadley (San Luis Potosi), qui exporte aux Etats-Unis par Tampico. Les mines sont dans le même Etat, et, dans celui de Queretaro, on traite, en outre, comme aux Etats-Unis, des plombs antimonieux.

En *Australie*, les stibines, exploitées irrégulièrement, sont fréquemment aurifères. On travaille surtout à Costerfield (Victoria), qui a produit, en 1907, 850 t. de concentrés à 40-50 p. 100 d'antimoine et 50 à 60 gr. d'or à la tonne, fondus en Angleterre ; un peu aussi dans le district d'Hodgkinson en Queensland.

En *Italie*, on exploite l'antimoine à Pinerolo, près de Turin. Nous étudierons le gîte de Pereta (Toscane). On peut citer encore Cettine di Cotor-

niano et Tocchi (province de Sienne) : San-Basilio, Ballao, Villasalto dans le district des Lanusei en Sardaigne. La production oscille autour de 500 t. En 1910, toute l'extraction, montant à 2194 t. de minerais à 25 p. 100, est venue de Sardaigne (Su Suergiu¹, Corti Rosas, Sa Mina et S'Arruaxio).

En *Asie-Mineure*, le principal district producteur est le Murad-Dagh, entre Koutaya et Ouchak. Puis vient la mine de Tchimli-kaya à CEdemich.

En *Hongrie*, on cite le gîte de Magurka, dans la chaîne granitique de Gumbir et celui de Kremnitz. La production de 1910 a été de 781 t. d'antimoine.

Le *Japon*, qui avait autrefois une production notable, estimée, d'après la statistique française de 1889, à 500 t. de métal, n'en a plus produit que 248 t. en 1907 et 201 t. en 1909.

Après ces principaux pays producteurs, nous nous contenterons de classer dans un ordre géographique ceux dont la production est faible ou intermittente.

Le *Portugal*, avec les mines de Tapada, de Lixa et de Gondomar près de Porto, produit des minerais, riches fréquemment aurifères, à près de 70 p. 100 ; avec celle de Corcega, des minerais de 20 à 50 p. 100.

En *Espagne*, on a signalé des mines dans la province de Badajoz, à Zalamea de la Serena et dans l'Estrémadure.

La production de l'*Angleterre* est nulle depuis 1892 ; mais on connaît des gîtes à Wheal Boys (Devonshire), à Salstah (Cornwall), à Glendinning, paroisse de Westkirk (Dumfrieshire). On cite, comme fondeurs anglais : Cookson, à Newcastle on Tyne ; Johnson and Matthey et Pontifex and Wood, à Londres.

En *Allemagne*, nous mentionnerons le gisement de Arnsberg en Westphalie ; ceux de Hoffnung, près de Brück sur l'Ahr, cercle d'Adenau ; de Goldkronach dans le Fichtelgebirge.

Au *Canada*, on a commencé, en 1908, à travailler deux filons de stibine à Lake George, comté d'York, dans le nouveau Brunswick². En 1910, on a extrait de la stibine aurifère dans le comté de Hants (Nouvelle Ecosse). D'autres gisements d'antimoine avec un peu d'argent et du bismuth ont été découverts en Colombie britannique, dans le district Slocan.

En *Bolivie*, une mine d'antimoine, située à environ 30 km. de la Paz, à Paléa, a été un moment exploitée en 1906.

Dans le Sud du *Pérou*, département de Puno, on a trouvé plusieurs gisements d'antimoine le long de la ligne de Mollendo. Ces gisements sont, du Sud au Nord : à Pucara (14 km. de Tirupate) en veines très pures sans des schistes décomposés ; à Araranca, à Aguas Calientes, où l'on voit quelquefois en même temps de l'or natif.

Bornéo (district de Sarawak supérieur) était, il y a quelques années, une source importante d'antimoine³. En 1881, on en a exporté pour une valeur de 1 800 000 fr. ; cette production est tombée à presque rien.

Commerce de l'antimoine. — On vend, ou de l'antimoine métallique (régule d'antimoine), ou du sulfure liquaté (antimoine cru), ou des

¹ Voir Coll. Éc. d. M., 1433 et 1434.

² 1886. GEORGE KOMZ. *Native Antimony and its associations at Prince William York Co New-Brunswick* (Am. ass. for ad. of sc., 34th meeting, p. 237. New-York).

³ Coll. Ec. d. M., 1511.

minerais (stibine et oxyde). La stibine renferme théoriquement 71,40 p. 100 d'antimoine; mais on ne dépasse guère une teneur pratique de 50 p. 100. Elle est assez difficile à séparer mécaniquement du quartz par broyage parce qu'elle s'écrase.

Les ventes se font à l'état de sulfure naturel plutôt qu'à l'état de sulfure liquaté (ou antimoine cru). Les minerais à 50 p. 100 d'antimoine sont considérés comme de première qualité; ceux au-dessous de 20 p. 100 trouvent difficilement preneur. Les minerais oxydés, plus coûteux et plus difficiles à réduire, sont payés un peu moins cher à teneur égale. En fait d'impuretés, l'arsenic et le plomb sont considérés comme très nuisibles; la pyrite de fer l'est moins.

Dans les minerais pauvres, le prix de l'unité augmente rapidement avec la richesse. S'il est, par exemple, de 4 fr. dans un minerai à 10 p. 100, il atteindra 10 fr. dans les minerais de première qualité. On arrive ainsi, dans les moments où l'antimoine est cher, à des produits qui valent de 5 à 700 fr. la tonne et qui n'ont subi d'autres frais que ceux de l'extraction et d'un triage assez sommaire; ce qui explique les floraisons éphémères auxquelles on assiste périodiquement pour toute une série de petites mines, destinées à bientôt disparaître dès que les cours s'abaissent¹.

Le plus généralement, les offres de minerais, s'adressant à un petit nombre de fondeurs, sont débattues de gré à gré.

Cependant on emploie aussi des formules de vente.

Vers 1890, les conditions de vente étaient souvent définies par la formule : $p = \frac{T}{100} \left(1 - \frac{1}{a}\right) (c - f)$, où p représente le prix de la tonne de minerai; T la teneur en centièmes constatée par voie sèche; $\frac{1}{a}$ le déchet de fabrication; c le cours du régule en francs par tonne; f les frais de fusion et le bénéfice du fondeur par tonne. En Angleterre, f était alors d'environ 450 fr.; a variait entre 9 pour une teneur de 20 p. 100 et 50 pour une teneur de 60.

Cette formule est encore quelquefois employée sous la forme :

$$V = 0,009 T (c - 330) \text{ en supposant } a \text{ égal à } 10 \text{ et } f \text{ à } 330.$$

Elle peut se traduire en disant qu'on paye 90 p. 100 de l'antimoine contenu et qu'on retient 330 fr. pour les frais de transport et de fusion et le bénéfice. D'après cette formule, pour un cours de 1 485 fr., un minerai à 50 p. 100 vaudrait 519,75 fr. En réalité, avec les procédés anglais de traitement, on peut estimer les frais, y compris la perte, entre 225 et 310 fr.; avec le nouveau procédé français, à 200 fr. pour un minerai à 50 p. 100; mais ce chiffre ne comprend pas l'amortissement ni les frais généraux.

Aux États-Unis, le calcul se fait d'ordinaire autrement. Le métal étant à

¹ On admet, en Auvergne, que l'exploitation des petits filons n'est plus rémunératrice, quand le sulfure liquaté descend au-dessous de 400 francs la tonne (soit 800 francs pour le métal).

² 1892. BURTHE. *Sur la vente des minerais et du sulfure d'antimoine* (Ann. d. M., 9^e, t. 2, p. 163). — 1906. HAVARD. *Mineral Industry*, t. 15, p. 43-48. — 1907. WALTER RENTON INGALLS, *Ibid.*, t. 16, p. 62.

0,90 fr. le kilogramme, on achète couramment 5,20 fr. l'unité ou 270,40 fr. la tonne à 52 p. 100, avec une majoration de 0,20 fr. à 0,50 pour des minerais à haute teneur ou particulièrement purs (tandis que la formule précédente donnait 268 fr.). Si le prix du métal monte ou baisse, on ajoute un tiers de la variation du prix par tonne. Ainsi le cours de 1485 fr. la tonne donnerait un minerai à (270,40+195) ou 465,40 fr.

L'or et l'argent contenus dans les minerais d'antimoine sont ou ne sont pas payés spécialement suivant les cas; mais, si on ne les paye pas, ils contribuent à faire coter le minerai à un cours plus élevé.

Quoique le marché de l'antimoine soit aujourd'hui réglementé par un syndicat, le cours de ce métal est particulièrement variable. En 1902, il était tombé à environ 800 fr. la tonne. En 1906, il est remonté à environ 2400, pour retomber à 1600 en 1907, à 880 en 1908, à 790 en 1909, à 720 en 1910¹.

II. — MINÉRAIS D'ANTIMOINE

Le minerai ordinaire d'antimoine, quand on s'enfonce un peu dans la profondeur des gisements, est la *stibine*, Sb^2S^3 à 71,4 d'antimoine.

Mais ce sulfure s'accompagne souvent aux affleurements de produits oxydés qui, après avoir été longtemps négligés, jouent maintenant un rôle croissant en métallurgie. Les oxydes d'antimoine sont la *sénarmonite*, Sb^2O^3 à 83,5 p. 100 et l'*exitèle* ou *valentinite*, de même composition. On peut trouver, en même temps, à la superficie, de la *cervantite* Sb^4O^8 , de la *stiblite* $H^4S^4O^{10}$, du *kermès* ($2Sb^2S^3 + Sb^2O^3$) qui a parfois donné lieu à des confusions avec le cinabre ou, plus rarement, de la *nadorite* $PbSbClO^2$.

A la stibine répond l'*allemontite* $SbAs^3$, qui est une rareté.

Une foule d'autres corps antimonieux, sulfo-antimoniures de fer, cuivre, zinc, argent, mercure, présentent un intérêt minéralogique, ou peuvent être utilisés à la fois pour l'antimoine et pour un autre métal associé.

Il existe, en outre, un très grand nombre de minerais complexes, dans lesquels l'antimoine seul, ou associé avec du soufre, de l'arsenic, du tellure, du sélénium, se combine à des métaux divers, dont les principaux sont le fer, le cuivre, le plomb, le zinc, l'argent et le mercure: ces métaux pouvant, à leur tour, se remplacer en partie mutuellement. L'antimoine prend donc ici nettement le rôle d'un métalloïde de la famille du soufre.

Avec le fer, on a la *berthiérite*, $FeSb^2S^4$, tenant 9 à 16 p. 100 de fer.

Avec le cuivre, la *wolfsbergite* ou *chalcostibite*, $CuSb^2S^4$, la *famatinite*, Cu^3SbS^4 .

Avec le cuivre et le zinc, la *panabase* (cuivre gris). ($4CuSbS^2 + 3Cu^2S + 2ZnS$), qui présente une variété argentifère et ferrifère, la *freibergite*, une autre mercurielle, la *schwartzite*;

Avec le plomb, la *boulangerite*, $Pb^3Sb^2S^6$, la *jamesonite* $Pb^2Sb^2S^5$;

Avec le plomb et le cuivre, la *bournonite*, $CuPbSbS^3$;

¹ En septembre 1911, on a coté à Paris l'antimoine première marque 710 à 750 fr. la t. et 800 à 850 fr. en octobre. Dans cette année 1911, la mine de la Lucette a dû cesser toute vente pendant quatre mois. Les cours des dernières années, qui correspondent à une surproduction, ont amené la fermeture de beaucoup de petites mines et même les plus importantes, comme la Lucette, ont dû réduire leurs dividendes.

Avec le plomb et l'or, la *nagyagite* $(\text{Pb}, \text{Au})^2(\text{Te}, \text{S}, \text{Sb})^3$;
 Avec le plomb et l'argent, la *freieslébénite*, $3 \text{Ag SbS}^2 + 2 \text{PbS}$;
 Avec l'argent, la *dyscrase* Ag^3Sb , la *polybasite* (argent noir) Ag^6SbS^6 ,
 la *psaturose* ou *stéphanite* Ag^5SbS^4 , l'*argent rouge*, *pyrargyrite* ou *argy-
 rithrose* $\text{Ag}^3 \text{SbS}^3$, la *miargyrite* AgSbS^2 .

La *stibio-tantalite* renferme du niobium et du tantale.

On notera, dans cette liste, l'abondance des combinaisons argentifères définies.

D'autre part, un grand nombre de stibines renferment de l'or, comme nous le verrons.

Il est à remarquer que, dans les gisements filoniens, ni le soufre, ni l'arsenic, ni l'antimoine ne se sont déposés seuls primitivement ; il a fallu, en principe, une association métallique, ou du moins une combinaison de deux de ces métalloïdes entre eux, comme la stibine, le réalgar, l'or piment, l'allemontite.

III. — GISEMENTS D'ANTIMOINE¹

Rôle métallogénique et classification des gisements. — Le rôle métallogénique de l'antimoine en fait une sorte de métalloïde voisin de la famille du soufre, qui intervient surtout pour former des sulfosels acides, tantôt précipités isolément (stibine), tantôt combinés avec des sulfures métalliques basiques². Certains rapprochements apparents avec la famille de l'étain sont à rejeter en dernier examen, l'antimoine n'intervenant jamais dans les filons d'étain. Au contraire, nous allons trouver l'antimoine associé avec toute une série de métaux sulfurés, jusques et y compris le mercure.

Les dissolutions qui ont amené l'antimoine paraissent, comme celles qui ont apporté le mercure, avoir été susceptibles de s'étendre dans les terrains, de les imprégner, d'y remplir des fissures minces et peut-être même de rester sans se précipiter jusqu'au voisinage de la superficie³ : ce qui les différencie aussitôt totalement de l'étain (avec lequel l'antimoine présente, d'autre part, certaines analogies de gisements) pour les rapprocher du plomb ou même du mercure. C'est ainsi que nous trouverons d'assez nombreux gisements imprégnant irrégulièrement des grès ou remplissant les joints de terrains schisteux, ou encore partant des fissures d'un calcaire pour se substituer à lui sous un toit de schistes imperméables dans des conditions qui ont pu faire penser à un dépôt sédimentaire. Le type gîte de contact entre calcaire et schiste, si fréquent pour le zinc, le plomb, le mercure, apparaît ainsi dans le cas de l'antimoine.

¹ MONNET. *Sur les mines de plomb antimonié* (Ann. phys. et chim., t. 5, p. 169). — 1851. DAUBRÉE. *Sur la présence de l'antimoine et de l'arsenic dans les combustibles minéraux, dans diverses roches et dans l'eau de mer* (B. S. G. F., 2^e, t. 8, p. 350). — 1860. CAMPBELL. (DUGALD). *Présence de l'antimoine et de l'arsenic dans le sable des sources et rivières* (Bull. chim. appliq., t. 2, p. 370 ; Chemical news, 1860, p. 218).

² Voir plus haut, tome 1, p. 41.

³ Pour la même raison, il parait y avoir eu des remises en mouvements ultérieures dans le sens de bas en haut, qui ont contribué à développer les sulfo-antimoniures dans la zone de cémentation des gisements de cuivre, de plomb et d'argent (voir plus haut t. 1, p. 142 et 190).

Pour expliquer la formation de la stibine en filons, il y a lieu de rappeler sa synthèse opérée par Sénarmont (1851), en chauffant en vase clos, à 300°, un mélange d'antimoine et de soufre en présence d'eau pure, ou, à 250°, en présence du bicarbonate de soude.

On peut également rappeler la présence de l'antimoine dans les solfatares et, d'autre part, dans l'eau de mer.

Cependant la gangue de l'antimoine, tout en pouvant comporter à l'occasion des carbonates ou de la barytine, est de préférence, et le plus généralement, quartzreuse : indice probable d'eaux chaudes, alcalines, en surpression, dans des conditions assimilables à celles des geysers.

La liaison de l'antimoine avec des roches éruptives est souvent très directe et amène à se représenter la cristallisation de ce métal, ainsi que celle du mercure, comme ayant dû se produire dans des conditions assez analogues à celles du volcanisme. Cette relation existe parfois le long de la chaîne hercynienne avec des variétés de granulites en filons passant à des microgranites et bien différentes des masses grenues qui accompagnent l'étain, ou plutôt avec des microgranites proprement dits. Elle est encore plus nette dans les filons tertiaires, où il arrive, comme à Kostainik, de saisir presque sur le fait l'association avec des trachytes.

La *classification des gîtes d'antimoine* est assez difficile à établir. Minéralogiquement et industriellement, il pourrait y avoir lieu de faire une première grande distinction entre les gisements où l'antimoine est à l'état de sulfure et ceux où il se présente sous une forme oxydée. Les seconds, qui sont l'exception, dérivent, à notre avis, si nettement des premiers, par un effet d'altération ultérieure plus ou moins ancienne et plus ou moins prolongée en profondeur, que nous laisserons de côté cette division. Nous nous contenterons ici d'appeler l'attention sur quelques gîtes, où l'oxyde arrive à jouer un rôle prédominant (notamment en terrains calcaires) : gîtes souvent situés dans les régions à mouvements tertiaires, où le relief du sol est resté plus accentué et où la zone atteinte par la circulation des eaux oxydantes est plus épaisse : par exemple, en Algérie, à Djebel Hamimat, Djebel Nador, etc. Mais il ne faut pas oublier que beaucoup de gisements, même plus anciens, connus uniquement pour leur stibine, ont présenté, en outre, une certaine quantité d'oxyde, autrefois dédaignée ou même méconnue.

D'autre part, on a pu être tenté de voir, dans certains gisements d'antimoine, une forme sédimentaire. L'explication a été proposée dans le district d'Arnsberg en Westphalie, ou à Charmes dans l'Ardèche, comme au Djebel Hamimat en Algérie. Nous en citerons des exemples en étudiant au paragraphe 7° quelques types de filons-couches¹. Mais cette hypothèse d'un dépôt sédimentaire sulfuré contemporain des couches encaissantes, si discutable, comme nous l'avons vu, même dans les cas les plus précieux comme ceux du Mansfeld, de la Silésie, etc... nous paraît tout à fait à rejeter pour l'antimoine, dont les gisements pseudo-sédimentaires sont, ou des filons-couches, ou des produits remaniés.

Laissant donc de côté ces distinctions, nous établirons notre classification d'après le type de la métallisation, les associations de métaux

¹ Tome 1, page 775.

que celle-ci présente et la profondeur de cristallisation plus ou moins grande, le rapport plus ou moins direct avec les roches éruptives, qu'on peut lui attribuer en conséquence.

Ainsi nous sommes amenés aussitôt, malgré de nombreux cas intermédiaires qui rendent comme toujours les classifications discutables, à établir une coupure entre le type si caractérisé du Plateau Central et plus généralement des chaînes hercyniennes d'Europe, où la stibine, parfois aurifère, à gangue exclusivement quartzeuse, n'est accompagnée que d'un peu de pyrite ou de mispickel et, au contraire, le type algérien des remplissages complexes plombo-zincifères, dans lesquels la gangue est souvent de la calcite et de la barytine. Le premier type rapproche l'antimoine de l'or, et, par là, du groupe de l'étain; le second amène, comme cas extrême, l'association inverse de l'antimoine avec le mercure. Enfin, comme transition, on a le groupement fréquent avec le cuivre. La volatilisation de l'antimoine paraît ainsi s'être prolongée pendant toute la durée des fumerolles sulfurées, conformément à l'analogie connue du soufre et de l'antimoine; mais le dépôt ne semble pas avoir pu commencer quand dominaient les fumerolles chlorurées, origine des groupements stannifères, dans lesquels on trouve déjà des sulfures et des arséniures, mais peu ou pas d'antimoniures.

Dans le groupe des stibines isolées à gangue quartzeuse, nous en distinguerons de plus quelques-unes qui sont particulièrement aurifères. Nous signalerons également quelques groupements spéciaux des métalloïdes, soufre, arsenic et antimoine, entre eux. Enfin, il peut y avoir un certain intérêt à mettre en évidence les cas assez nombreux de filons-couches, ou de filons au contact des calcaires et des schistes, qui, par leur métallisation, rentrent déjà dans les groupes précédents.

Notre classification sera ainsi la suivante¹ :

- 1° Filons de stibine à gangue quartzeuse, avec pyrite et mispickel ;
- 2° Stibines particulièrement aurifères ;
- 3° Association de l'antimoine et du cuivre, cuivre gris ;
- 4° Association de l'antimoine et du plomb ou de l'argent ;
- 5° Association de l'antimoine avec le mercure ;
- 6° Association de l'antimoine, de l'arsenic et du soufre ;
- 7° Filons-couches et filons au contact des calcaires avec les schistes.

Comme notion d'âge, les groupes 1 et 2 appartiennent de préférence à la série primaire et se localisent volontiers, en Europe centrale, dans la période westphalienne, avec rappel plus rare d'une phase antérieure; les groupes 4 et 5 sont plus récents et l'association avec le mercure (5) est presque localisée dans la phase tertiaire.

1° FILONS DE STIBINE A GANGUE QUARTZEUSE AVEC PYRITE ET MISPICKEL

Les filons d'antimoine, qui vont être étudiés ici, se présentent très généralement sous des formes analogues entre elles, à l'état de veines quartzuses, déjà souvent irrégulières par elles-mêmes, dans lesquelles la

¹ Voir dans l'ouvrage de Beck, une classification différente, t. 1, 453 et 496; t. 2, p. 204 et 302.

stibine est, à son tour, très irrégulièrement disséminée par mouches, nids, paquets, lentilles, veinules, ou, dans les cas les plus favorables, colonnes d'enrichissement. Il est rare qu'au quartz s'associe une gangue de calcite; nous en citerons cependant des exemples, souvent encaissés dans des calcaires : ce qui laisse alors supposer un emprunt au terrain encaissant.

La minéralisation est presque toujours simple : stibine, pyrite et parfois mispickel, auxquels il faut ajouter les produits d'altération normaux, valentinite, sénamontite, kermès, etc. Parfois, on trouve, en outre, des indices d'autres sulfures, qui font penser aux gisements complexes étudiés dans un paragraphe suivant. De même, des traces d'or fréquentes préparent la transition aux stibines aurifères décrites plus loin.

Ces gisements sont particulièrement bien développés le long des chaînes hercyniennes, où ils donnent, pour la plupart, l'impression d'être plus récents, ou moins profonds, que les gisements d'étain. Au contact, on trouve souvent une roche filonienne du groupe des microgranulites, avec laquelle l'étain paraît être en relation et qui a pu subir une transformation comparable à celle des granulites en zwitter le long des filons d'étain¹. Nous en citerons quelques exemples nets dans le Plateau central.

L'âge de ces gisements d'antimoine hercyniens est particulièrement bien daté et uniforme sur de grandes étendues. On les trouve très souvent associés avec les terrains dinantiens du culm (11), les recoupant par des veines peu postérieures, comme c'est le cas pour les microgranulites associées, tandis qu'ils ne traversent jamais le stéphanien (13). Il y a donc relation nette avec la mise en place des microgranulites pendant le westphalien (13). Les mêmes massifs hercyniens, qui ont souvent subi plus tard des dislocations tertiaires, pourront d'ailleurs renfermer d'autres filons antimonieux plus récents, d'un tout autre type, notamment avec association de plomb caractéristique. On croit en reconnaître des exemples dans le Plateau central.

Afin de mettre en évidence cette unité de formation, nous allons suivre la chaîne hercynienne de l'Ouest à l'Est, en décrivant les principaux centres antimonieux que nous rencontrerons en Portugal, en Espagne, en Armorique, dans le Plateau Central et en Bohême.

Portugal (bassin du Douro)². — La région située à l'Est de Porto, entre cette ville et Penafiel, présente, le long d'un synclinal siluro-carbonifère, une importante zone antimonieuse de direction N.-W., allant sur 20 km. de long, de S. Lourenço d'Armes à Vallongo, Gondomar, Sarnades et Gondarem (fig. 116).

La même zone renferme également un peu d'étain, de wolfram et de plomb. On cite notamment les gites de Gondomar, Tapada, Lixa, Corcega comme donnant de beaux minerais d'antimoine massifs. Ces stibines du Portugal sont fréquemment un peu aurifères et l'on y trouve des cristaux d'or natif. A Ribeiro da Egrega (prov. de Minho, à 20 km. de Porto), on a exploité sans succès, en 1907, un filon encaissé dans les schistes siluriens

¹ Voir tome 2, pages 15, 41.

² 1893. BREIDENBACH. *Die Antimonlagerst. Portugals* (Essener Glückauf, t. 29, p. 1095-1096; 1141-1142). — Coll. Ecole d. M., 1425 (Sitio do Tojo), 1426 (Tapada do Padra).

Massif Armoricain. — L'extrémité Est du massif Armoricain comprend quelques gisements de stibine, dont le principal est celui de la *Lucette* (Mayenne), qui sera décrit avec les stibines aurifères¹. Ce groupe peut être considéré comme en relation avec les mispickels primaires (également aurifères) de la même région.

Il existe un autre gisement de stibine avec traces d'or au *Semnon* (Ille-et-Vilaine).

Ce gisement du Semnon, découvert en 1892, forme un épais filon N. 70° W., à 2500 m. W. de Martigné sur la falaise Nord du Semnon. Le filon recoupe les schistes anciens au contact de la diorite. Son épaisseur totale est d'environ 7 m. Le remplissage est formé de quartz, au milieu duquel se trouvent des veinules de stibine, qui peuvent atteindre 7 à 8 cm. Il contient aussi de la pyrite un peu aurifère, du mispickel et du cuivre, qui donne, en certains points, au minerai des reflets bleus et violacés. La gangue comprend de la calcite. Le minerai ne renferme ni arsenic, ni plomb, les deux corps les plus gênants pour le traitement. A la surface, on a eu une très courte zone oxydée.

Plateau Central². — Le Plateau Central comprend un grand nombre de filons de stibine (fig. 117), dont la plupart ont été, à diverses reprises, exploités. Ayant eu l'occasion d'en étudier plusieurs de près, je donnerai, sur eux, quelques détails.

Tout d'abord, en *Bourbonnais*, un certain nombre de petits gisements, que j'ai notés sur les feuilles de Moulins, Gannat, Montluçon et Aubusson, sont en relation d'origine bien probable avec les microgranulites carbonifères qui recoupent de tous côtés les mêmes régions et qui passent fréquemment, comme je l'ai signalé autrefois, à de véritables quartz.

A l'Est de l'Allier, à *Bresnay*, canton de Souvigny, on a fait des recherches en 1763. Le gisement formait deux filons dans le granite, à une certaine distance l'un de l'autre, le premier à Montmalard, dirigé N.160°E. et oublié depuis 1776; le second aux Bergerats, dirigé N.140°E., concédé en 1783 et également abandonné bientôt après. Le minerai, accompagné par une sorte de granulite à mica blanc, était formé de quartz et stibine, avec passablement d'oxyde à la surface.

Plus au Sud, les gisements se multiplient autour de la grande nappe intrusive de microgranulite de Servant, Pouzol, Racles, etc.

¹ Tome 1, p. 761.

² Gisements visités de 1885 à 1900. — Coll. Ec. d. M., 1329 (Nades); 1330 (Racles); 1652 (Freydenet); 1688 (Chazelles); 1692 (la Fage), 1693 (Tailhac); 1697 (Barlet); 1718 (la Licoulne); 2365 (Ailly); 2381 (Mérinchal); 2382 (Montignat); 2397 (Pontgibaud); 2403 (divers); 2459 (la Planche); 2460 (Fraissee); 2501 (Bonnac); 2504 (Quintillau); 2571 (Savennes). — 1817. VAUQUELIN. *Sur un minerai d'antimoine près de Montluçon* (Allier) (Ann. de phys. et chimie, t. 7, p. 32). — 1844. BOULANGER. *Description de l'Allier*, p. 355 et 359. — 1855. GRUNER. *Classification des filons du plateau central et description des anciennes mines de plomb du Forez* (Soc. d'agriculture de Lyon, 23 nov.). — 1860. DUFRENOY. *Minéralogie*, t. 2, p. 384. — 1861. COTTA, p. 417. — 1870. BURAT. *Géologie appliquée*. — 1878. CARNOT. *Gîte de Chanac* (Corrèze) (Ann. d. M., 7^e, t. 13, p. 394). — 1893. BURTHE. *Sur la mine d'antimoine de Freydenet* (Ann. d. M., 9^e, t. 3, p. 15). — 1901. L. DE LAUNAY. *Excursion à quelques gîtes du Plateau Central. La mine d'antimoine de Montignat*, p. 16 à 18; *Notices des feuilles de Moulins* (1887), Montluçon (1892), de Gannat 1896), Aubusson (1902), etc.

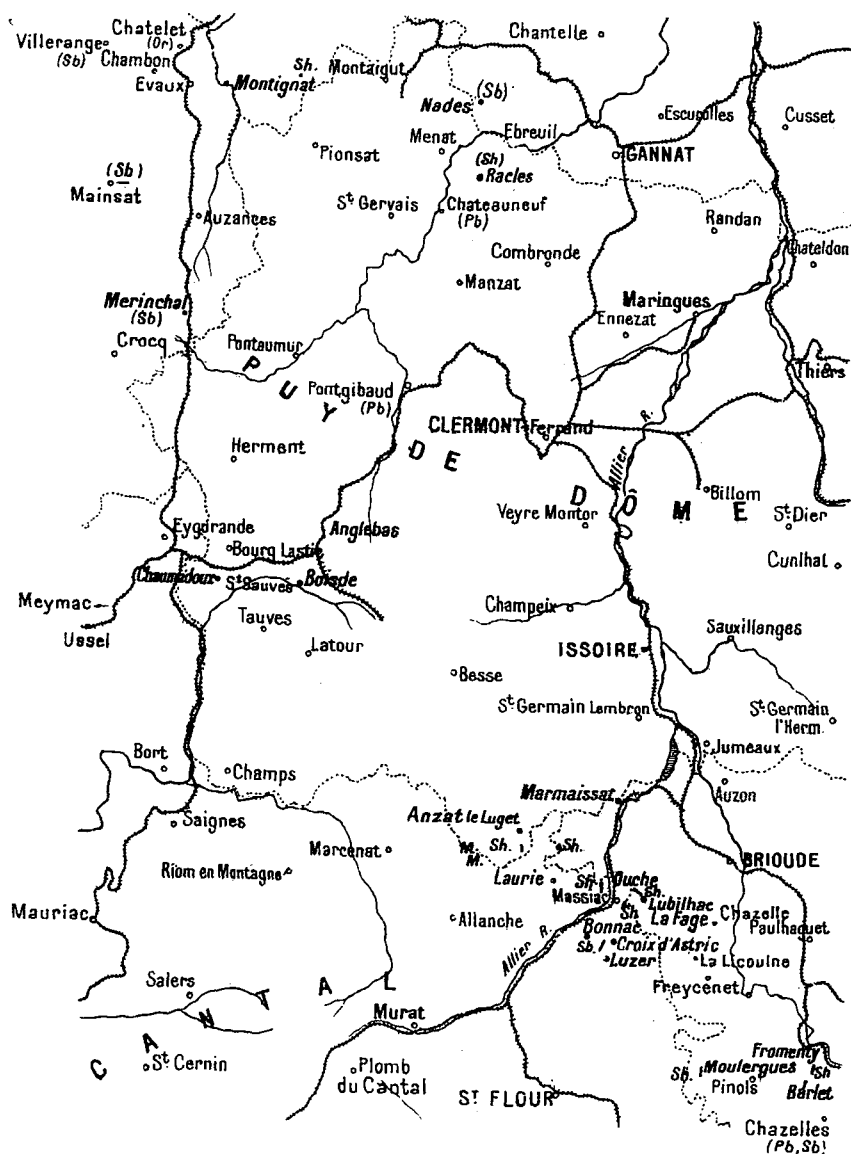


Fig. 117. — Carte des gîtes d'antimoine, plomb, or, etc., d'une partie du Plateau Central. Echelle au 1/1 000 000^e.

Sb. Antimoine. — M. Mispickel. — Pb. Plomb.

C'est, au Nord, la mine de *Nades*, intercalée entre ces microgranulites et le massif de granulite des Colettes¹, dans les micaschistes : mine

¹ Voir plus loin, tome 1, page 312.

découverte en 1825, concédée en 1829, exploitée alors jusqu'en 1837, reprise un instant vers 1880.

La stibine s'y trouve dans deux filons N.-W. : le premier de 1,20 m. d'épaisseur et le second, dit filon de la Tranchée, un peu moins épais. La gangue est quartzeuse.

Sur le bord Sud de la même nappe, les traces d'antimoine se multiplient près de Saint-Rémy, de Blot et de Marcellat, parfois dans la microgranulite même (*les Racles*), plus souvent dans les micaschistes pénétrés par celle-ci.

A l'Ouest, une autre importante zone antimonieuse suit les traînées de microgranulite si nombreuses que l'on trouve autour d'Evaux, Chambon, etc. (dans la Creuse)¹. Ces gisements sont pour la plupart, en rapport très direct avec le dinantien, dans lequel ils s'éparpillent fréquemment (*Villerange, Boursonneix*, etc.). Ils s'associent avec des filons de pyrite aurifère très nombreux, dont on a commencé l'exploitation au Châtelet² et la même région présente aussi des traces d'uranium et de tungstène. Deux points ont été surtout exploités : à *Montignat* (Allier) et, plus au Sud, à *Mérinchal*, dans la Creuse.

A *Montignat*³, on a reconnu un stockwerk de quartz à stibine dans un dyke de roche intermédiaire entre les granulites et les microgranulites et formée d'un agrégat microcristallin de quartz et feldspath pauvre en mica blanc avec pyrite abondante : dyke encaissé lui-même dans un gneiss très granitique. Le dyke, dirigé N. 40° E., est régulier sur 300 m. de long ; mais les veinules antimonieuses y sont très irrégulièrement distribuées. La stibine y est associée avec du quartz, un peu de calcite et du mispickel, formant des veinules qui ne dépassent guère 0,5 cm. à 2 cm, sauf dans quelques lentilles très localisées. La figure 118 représente un de ces minerais vu au microscope.

A *Mérinchal*, la stibine était absolument localisée dans une granulite passant aux microgranulites.

Ailleurs, Grüner⁴ a signalé la présence fréquente d'antimoine sulfuré dans des veines de quartz qu'il considère comme en relation directe avec des roches appartenant au groupe des granulites.

Ainsi, au Sud de *Saint-Yrieix* (Haute-Vienne), sur la route de Juilliac, entre Glandon et le pont de la Rouchouse, les schistes micacés ou amphiboliques sont recoupés par de nombreux filons de granulite N. 45° E., de 0,50 m. à 1 m., dans l'axe desquels on trouve souvent, d'après lui, une veine de quartz chargée d'antimoine sulfuré. L'une a été exploitée à Coussac-Bonneval. Dans une autre, à l'Est de la forêt de Biaz (commune de Glandon), on voit nettement, toujours suivant le même auteur, au centre d'un filon de granulite de 1 m., deux zones d'un quartz gris laiteux de 0,08 m. à 0,10 m., légèrement imprégnées de stibine et, entre les deux, une tranche mince d'antimoine sulfuré de 0,01 m. à 0,02 m.

¹ Voir pour tous ces gîtes. L. DE LAUNAY. *Feuille d'Aubusson et notice annexe*. Cette feuille montre bien comment la stibine apparaît avec la microgranulite et disparaît avec elle.

² Près du Châtelet, des mouches de stibine ne sont pas aurifères.

³ Voir *Congrès géologique de 1901*, p. 16, et 1902. *Les Roches éruptives carbonifères de la Creuse* (Bul. Carte géol., n° 83, p. 95).

⁴ *Classification des filons du Plateau Central*, p. 10.

Enfin vers le S.-W., à *Chanac*¹, à 10 km. Sud de Tulle (Corrèze), Ad. Carnot a décrit, en 1878, des veines de stibine, de 0,40 m. à 0,70 m., encaissées dans des schistes argileux noirâtres.

Mais les gisements importants du Plateau central sont ceux que l'on exploite dans le groupe de Massiac, Brioude, etc. (Haute-Loire, Cantal)², où leur type très différent comporte une association plombo-antimonieuse, d'âge peut-être tertiaire.

Les concessions d'antimoine sont nombreuses dans cette région. La plupart étaient inexploitées, en 1887, quand la hausse du métal les a fait reprendre un moment. Les exploitations portent surtout sur l'arrondis-

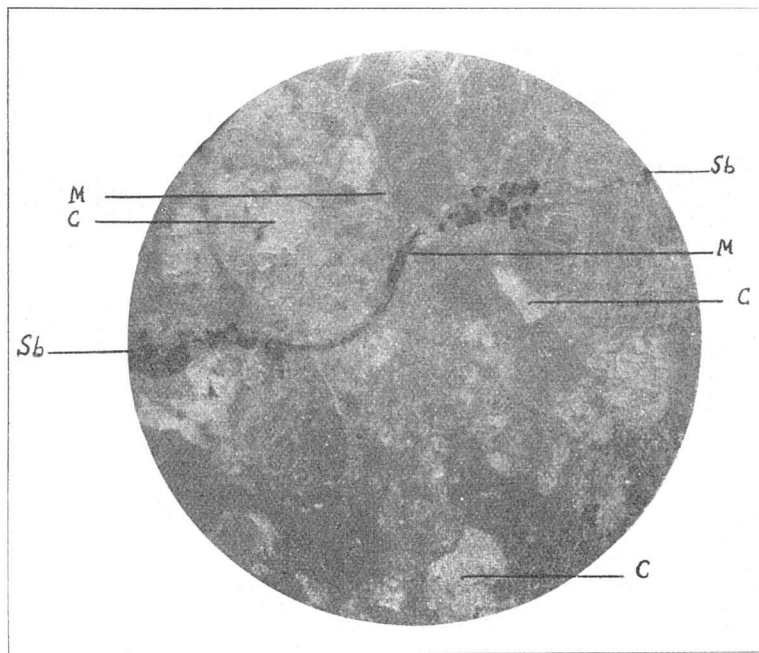


Fig. 118. — Veine de granulite à stibine de Montignat. Grossissement 20 D. Lumière transmise.

La plaque est formée de quartz avec une veine de stibine (Sb), un peu de mica blanc (M) et de la calcite (C).

sement de Brioude (gites de Marmeissat, La Fage, Chazelles, la Licoulne, Freycenet) et, plus à l'Ouest, sur le canton de Massiac, dans le Cantal (Ouche, Croix-d'Astric, Luzer) (fig. 117).

Le faisceau, dirigé N. N-W., va disparaître au Sud-Est à la traversée du grand massif granulitique de la Margeride, qui est, comme la plupart des granulites semblables, stérile en filons métallifères sulfurés, mais reparait ensuite dans le Gard et l'Ardèche (Malbosc, etc.).

Ces gisements sont tous encaissés dans le terrain primitif, gneiss,

¹ Coll. Ecole des Mines, 1957.

² Voir les feuilles de Brioude et de Saint-Flour.

micaschistes ou granite. Ils se présentent sous forme de filons quartzeux verticaux contenant des lentilles de stibine, séparées par des intervalles stériles. On trouve, par exemple, une veine de sulfure compacte, de 20 à 30 cm. d'épaisseur, continue sur une dizaine de mètres, puis 10 à 15 m. de terrain à peu près stérile. L'épaisseur moyenne du remplissage utile dans les exploitations fructueuses atteint 15 à 30 cm. Quelquefois aussi, le sulfure est intimement mélangé avec la gangue quartzeuse.

Presque toujours, le sulfure d'antimoine est accompagné de pyrite de fer, dont la proportion est fort importante à déterminer par l'analyse ; en effet, ce sulfure donne au minerai un aspect entièrement métallique, qui peut faire croire à une forte teneur en antimoine.

Il intervient également du mispickel, se rattachant au groupe des mispickels parfois aurifères, que l'on exploite à Bonnac, un peu au Sud de Massiac, où il s'associe avec un wolfram très ferrique.

Mais, en même temps, comme nous venons de le dire, on trouve aussi souvent du plomb, en sorte que, si nous nous conformons strictement à notre classification, plusieurs de ces gisements auraient dû être réservés pour un paragraphe suivant.

Aux affleurements, ces filons contiennent fréquemment, sur quelques mètres, de l'oxyde d'antimoine en masses cristallines ou amorphes de couleurs variées. Ces oxydes, autrefois négligés, ont été recherchés avec activité depuis 1889, et expédiés surtout à Brioude, où se trouvent deux usines métallurgiques.

Nous décrirons seulement deux de ces gisements : Freycenet et La Licoulne.

Le système filonien de *Freycenet*¹, à 6 km. W. de Lavoute Chillac, est encaissé dans les micaschistes et, accessoirement, les gneiss. Il comprend sept filons d'antimoine, plus trois filons complexes plombo-antimonieux et argentifères à boulangérite et un filon de galène argentifère. Ce système, dans lequel on a voulu voir deux groupes distincts, se sépare donc, par sa minéralisation et probablement par son âge, de ceux que nous avons étudiés jusqu'ici dans le Plateau Central et représente l'association du plomb et de l'antimoine. C'est seulement pour ne pas rompre l'unité géographique que nous le décrivons ici. Concédé en 1854, il a été repris en 1889 par la C^{ie} des Mines de Bonnac².

Tous les filons antimonieux, dirigés tantôt E.-W., tantôt N.-S., sont formés d'un quartz bleuâtre sec et compact, parsemé de fines aiguilles de stibine quand le filon est pauvre et disparaissant quand le filon s'enrichit. La pyrite y est peu abondante. On y trouve parfois de la calcite et des traces de blende, jamais de plomb ni d'arsenic. Le minerai n'est ni aurifère, ni argentifère. Les parties riches sont disposées par amas ne dépassant pas quelques mètres cubes. Dans le filon n^o 2, on a cependant exploité une colonne de 63 m. de long sur 98 m. de haut.

¹ Gisement visité en 1901. — Coll. Ec. d. M., 1652. — 1893. BURTHE: *La mine d'antimoine de Freycenet*. (Ann. d. M., juillet).

² Le principe, administrativement trop fréquent, de concéder séparément deux métaux que la métallogénie réunit, a causé ici, comme dans d'autres cas, beaucoup d'ennuis: l'antimoine et le plomb ayant été attribués d'abord, dans le même gîte, à deux concessionnaires différents.

Le principal filon complexe est celui de la Rodde (Ally), où l'on a repris d'anciens travaux; beaucoup plus étendus en profondeur qu'on ne le pensait au début. Le minerai était formé de quartz et galène antimoniale très argentifère (près de 4 kg. à la tonne de plomb) avec un peu de barytine. A la surface, il s'était produit de l'oxyde plombo-antimonieux jaune, de la berthiërite (FeSb^2S^4) et du massicot (PbO).

Enfin le filon des Ardennes ne renferme que du quartz et de la galène avec un peu de barytine sans antimoine.

En 1890, on a exploité l'antimoine avec un prix de revient de 347 fr. par tonne de métal.

Les anciennes concessions de *Barlet*, *Chazelles*, *Lubilhac* renferment une association métallifère analogue, sur laquelle ont également porté des travaux anciens.

Un peu plus au Nord, les gisements peu importants de *Mercœur* et de la *Licoulne* (Haute-Loire)¹, ont été l'objet, en 1876, d'un rapport de Fuchs, que nous résumerons.

Les filons, encaissés dans un grand plateau gneissique dont l'altitude moyenne est de 980 m., forment 3 groupes: 1° *Mercœur*, 2° *Valadou*, 3° la *Licoulne*.

Le principal filon de *Mercœur* est celui de la Bissade, dont les affleurements sont visibles, sur plus de 2 500 m., à l'Est de *Mercœur*. Ce filon, assez sinueux, a, en moyenne, une direction N. 26°. Son remplissage est formé de stibine massive avec un peu de quartz. Les épaisseurs ont atteint, paraît-il, 0,30 m. à 0,60 pour la partie métallique, quelquefois sur une cinquantaine de mètres.

Parfois, le filon se bifurque en plusieurs veines. Généralement, il forme de grandes lentilles qui se terminent en veines et se remplacent l'une l'autre. Le minerai est nettement séparé de la roche encaissante. Il n'y a pas d'épontes, mais les gneiss ont été altérés, sur une certaine épaisseur, au contact du filon, et il s'est formé une salbande argileuse, où de la stibine est fréquemment disséminée. La stibine contient une petite proportion de plomb et de faibles traces d'argent, mais paraît tenir peu d'arsenic.

Le filon du *Valadou* est, en moyenne, N. 54° E.; on l'a recoupé par un certain nombre de galeries en direction, échelonnées sur 110 m. de haut.

La roche encaissante se compose de schistes anciens très résistants et inaltérés au contact. Le minerai forme une série de colonnes, dont l'épaisseur peut atteindre 30 cm., mais qui sont séparées par des parties absolument stériles. Il semble un peu plus argentifère que celui de *Mercœur*.

Ce filon de *Valadou* est recoupé par un croiseur quartzeux à mouches d'antimoine, dirigé N. 30° E.

Enfin, les filons du groupe de la *Licoulne* sont assez nombreux et se recoupent irrégulièrement. Les deux plus importants ont été explorés sur près de 300 m. de hauteur. Leur minéralisation est moins forte qu'à la Bissade.

¹ Coll. Ecole des Mines, 1718. — Description plus détaillée dans les *Les Gîtes métallifères*, t. 2, p. 197 à 199.

Malbosc (Ardèche)¹. — Le long de la ligne de Langogne à Alais, il existe toute une série de concessions d'antimoine, qui alternent avec des concessions de plomb comme Vialas, etc., et qui, d'après ce que nous venons de voir à Freycenet, n'en sont peut-être pas absolument distinctes comme on l'a généralement cru.

C'est, du Nord au Sud : à l'Est de la ligne, Malbosc (Ardèche), Fraissinet (Gard), Auzonnet (Gard); à l'Ouest, dans la Lozère, Cassagnas, Collet de Dèze, Saint-Michel de Dèze, Terrailon, Martinet (Gard), etc.

Le gîte de Malbosc, dans l'Ardèche, a été autrefois l'objet d'une étude d'Elie de Beaumont.

Il se compose de filons quartzeux N.W.-S.E., recoupant des micaschistes, qui reposent eux-mêmes, à une petite distance de la mine, sur le granite de la Lozère.

Ces filons contiennent une faible proportion de calcite et de barytine. La stibine y est disséminée, soit en mouches rayonnées, soit en veines très irrégulières ayant, au plus, 0,20 m. à 0,10 d'épaisseur. L'allure de ces veines est très variable : tantôt elles se portent au toit, tantôt au mur du filon quartzeux ; parfois elles se divisent ou se perdent complètement. Cette irrégularité a fait, depuis longtemps, abandonner l'exploitation.

Charmes (Ardèche). — Le gisement de Charmes présente cet intérêt théorique que sa formation est certainement postérieure au trias et peut-être d'âge tertiaire d'après ce que l'on observe pour d'autres gîtes voisins. Ce qui pose également un point d'interrogation pour l'âge des derniers gisements plombo-antimonieux signalés plus haut.

Il existe là une région, où la dolomie triasique, recouvrant le granite sur une faible épaisseur, a été imprégnée de silice et stibine, comme, plus fréquemment, on trouve des terrains du même âge chargés de galène. Cette dolomie présente des amas irréguliers et sans allure déterminée consistant en silex brun, accompagné de barytine et de stibine, formant tantôt des veines et tantôt des nodules radiés.

On a généralement décrit autrefois ce genre de métallisation, qui se présente sur tout le pourtour du Plateau Central, dans le Morvan, dans l'Indre, etc., comme résultant d'épanchements siliceux contemporains du terrain encaissant. Nous y voyons beaucoup plutôt une métallisation postérieure ayant formé une sorte de filon-couche.

Arnsberg et Brilon en Westphalie². — Il existe, en Westphalie, des gisements d'antimoine, liés au dinantien comme la plupart de ceux que nous avons décrits dans l'Allier et dans la Creuse : gisements, à propos desquels on a soutenu l'hypothèse d'une formation sédimentaire, mais qui nous paraissent nettement dus à une action filonienne hydrothermale,

¹ 1821. P. F. JABIN. *L'extraction et le traitement des minerais de Malbosc* (Ann. d. M., 2^e, t. 1, p. 3). — 1829. *Description de Malbosc* (Karsten. Arch., f. 18, p. 158). — 1830. DELAMOTTE. *Mémoire sur Malbosc* (Manuscrit à l'École des Mines). — 1841. EL. DE BEAUMONT. *Explic. de la carte géologique*. p. 173.

² 1833. C. BUFF. *Ueber Gangbildungen*, etc. (Karst. Arch. f. Min., t. 6, p. 439). — 1834. ARNDT. *Ueber den Bergbau... bei Arnsberg* (Eberfeld). — 1890. *Beschr. der Bergrev. Arnsberg, Brilon und Olpe* (herausg. vom Kgl. Oberbergamt zu Bonn, p. 158).

exercée ici dans des conditions un peu spéciales, mais nullement exceptionnelles pour l'antimoine.

Le premier de ces gisements est à la mine de Casparizeche près d'Uentrop (Arnsberg) dans le niveau du Plattenkalk qui occupe le sommet du culm dinantien ; le second à la mine Passauf près Nuttlar (Brilon) dans les grès stériles. Cette différence de niveau est déjà en faveur d'une origine épigénétique, qui s'accuse, d'autre part, par des fentes minéralisées.

La mine d'Arnsberg est sur le flanc Sud-Est d'un grand anticlinal disloqué. On y trouve cinq petits bancs de quartz antimonieux épais de 5 à 15 cm., qui ne coexistent pas, mais qui forment des lentilles restreintes chevauchant l'une sur l'autre.

La stibine y est accumulée par nids dans un schiste que teintent en noir des parties charbonneuses et qui ne repasse au schiste normal qu'à une distance assez grande du gîte. Le minerai le plus homogène occupe le milieu de la couche ; il se bifurque au toit et au mur en masses bacillaires isolées qui ne sortent jamais de la couche. On indique la blende, la calcite et la fluorine comme accompagnant rarement la stibine. La pyrite est fréquente. Aux affleurements, il s'est développé des minerais oxydés.

A Nuttlar, on a de même trois petites couches de schistes siliceux et argile noire avec nids de stibine.

Brück an der Ahr (Adenau)¹. — A Brück, dans l'Eifel, des filons d'antimoine traversent les grauwackes paléozoïques. Dans une zone N.S. d'une trentaine de mètres de large sur 160 m. de long, de nombreuses veinules N.E. renferment stibine, pyrite, quartz et sidérose, en pénétrant parfois dans les joints des schistes encaissants.

Harz, Fichtelgebirge, Erzgebirge. — Les régions métallisées du Harz, du Fichtelgebirge et de l'Erzgebirge, renferment un certain nombre de gisements qui, par la complexité de leur remplissage comme par le caractère tectonique de la région métallisée, se différencient des gîtes précédents et que nous décrivons, dès lors, dans les paragraphes suivants, mais dont il est pourtant utile de mentionner ici la place.

Bohême². — En Bohême, on cite le gisement de Příklad, près Selčan, où des filons de hornstein antimonieux atteignant 20 m. de puissance, mais très irrégulièrement métallisés, recourent un massif granitique près de filons de kersantite.

Lessnig (Alpes Orientales). — A Lessnig, dans le Drautal, il existe trois filons d'antimoine de 1 à 2 m., dont la richesse en antimoine va parfois en croissant vers l'axe.

¹ 1827. ENBREICH. *Geogn. Besch. der Spiersglanz-Lagerst. bei dem Dorfe Brück* (Karst. Arch. f. Min., t. 6, p. 44-53).

² 1874. HELMHAKER. *Der Antimon Bergbau Mileson bei Krasnahora in Böhmen* (B. u. H. Jahrb. d'Autriche, t. 22, p. 540). — 1881. SCHWARZ. *Das Punnauer Antimonbergwerk bei Michaelsberg in Böhmen* (Oest. Z. f. B. u. H., p. 595-608. — 1901. HOFMAN. *Antimonitgänge von Příklad* (Z. f. pr. G., p. 94).

Anatolie Occidentale. — Nous laissons de côté les gites de Serbie et de Macédoine, qui trouveront leur place aux paragraphes 6° et 7° et nous passons en Asie. L'antimoine est une substance assez commune en Anatolie. Il s'y présente, comme c'est le cas pour tous les gisements des terrains primaires, en veines irrégulières et tendant souvent à s'interstratifier dans les schistes, plutôt qu'en véritables filons. L'âge de ces gisements nous est généralement inconnu. La formation est toujours irrégulière. La stibine n'est accompagnée, d'après les descriptions, que de quartz et de pyrite. Cependant il faut peut-être attacher quelque intérêt au rapprochement géographique que nous indiquerons tout à l'heure entre un des plus importants parmi ces gisements et une mine de cinabre. On pourrait être tenté de voir là un exemple de ces associations tertiaires du mercure et de l'antimoine qui seront étudiées plus loin.

Des gisements d'antimoine existent : dans l'île de Mételin ; puis au Sud des borates de Sultan-tchair ; ailleurs, à l'Est de l'Olympe de Bithynie. On en trouve de plus importants au Sud de Koutaya et enfin au Sud-Est de Smyrne. Tous ces gisements sont des filons de stibine, contenant plus ou moins de pyrite et encaissés dans des schistes argileux, schistes métamorphiques, micaschistes ou gneiss.

A *Mételin*, j'ai visité autrefois, au Nord de Skopelo, des veines de quartz à stibine sans importance pratique, interstratifiées par intrusion dans des micaschistes.

A *Demir-kapou*, au Sud des mines de borates de Sultan-tchair, on a exploré jadis des lentilles de quartz avec stibine, intercalées dans les schistes argileux, sur 2 m. de long et quelques centimètres de large.

Plus au N. E. et à l'Est de l'Olympe de Bithynie, entre Inegol et Biledchik, à *Sulukköi*, c'est dans des gneiss que l'on a exploré sans succès, vers 1890, des lentilles antimonieuses.

Enfin, si nous nous enfonçons dans l'intérieur, des mines qui semblent, au contraire, avoir une importance sérieuse, sont situées au S. W. de Koutaya, à environ 24 km. E. de *Gedis*, au Nord du Murad-Dagh, à Gömechtchiflik-Antimonmaden. Elles appartiennent à la liste civile du Sultan, qui les a affermées à une société grecque.

Ici il s'agit de filons et veines dans un gneiss amphibolique passant à un cipolin. Les filons, très irréguliers, comme c'est le cas à peu près constant pour l'antimoine, changent sans cesse d'allure et d'épaisseur. Ils ne dépassent pas quelques centaines de mètres de long, avec au maximum 2 m. d'épaisseur. On les a seulement exploités à ciel ouvert.

La région située au Sud de *Smyrne*¹ présente, parmi divers affleurements d'antimoine un gisement exploité d'une certaine importance et qui a, en outre, pour nous, cet intérêt d'accuser le rapprochement avec le mercure que j'ai signalé en commençant et sur lequel nous reviendrons au paragraphe 5°. Cette mine de Tchimli-kaya est à 20 km. S.-E. de

¹ Coll. Ecole des Mines, nos 1203 et 2499, antimoine de Sahty-déré. — 1841. HAMILTON et STRICKLAND. *On the Geology of the west. part of Asia Minor* (Trans. Geol. Soc., London, t. 6). — 1845. SPRATT. *Observations on the geology of the southern part of the gulf of Smyrna and promontory of Karabournou* (Quart. Journ. Geol. Soc., t. 1, p. 156-160). — Voir dans les *Rich. min. de l'Asie*, la carte des mines d'Asie-Mineure, p. 614.

Oedemich (100 km. E.-S.-E. de Smyrne), sur le flanc N.-W. du Balam-boli-Dagh. On signale plusieurs filons ; mais on n'en exploite qu'un, formé de deux veines voisines et parfois réunies, que l'on peut suivre sur plusieurs kilomètres. Leur épaisseur variable peut atteindre plusieurs mètres. Cette fracture métallisée se trouve au contact de deux catégories de schistes différentes. Elle est remplie par des matériaux empruntés à ces schistes avec un mélange de stibine et de pyrite, où la proportion de pyrite s'est accentuée en profondeur.

Au voisinage, près des villages de *Kalikoï* et de *Kouré*, les mica-schistes et schistes argileux contiennent diverses veines pyriteuses renfermant parfois des traces de mercure, ou même de véritables filets cinnabriques, qui ont pu laisser supposer l'existence d'un gîte exploitable, mais encore inexploité.

La production de ces gisements d'Asie Mineure a pu monter à 2 500 t. de stibine (1 036 t. exportées en 1906).

La principale mine est celle de Gedis, près de Koutaya. En 1901, 100 hommes y extrayaient, par campagne de huit à neuf mois, environ 500 t. de minerai trié valant 250 000 fr. La mine de Tchinkli-kaya (ou Djïouli-kaya), près Oedemich, appartient à une compagnie grecque et a donné, en 1898, 500 t. de minerai valant 160 000 fr.

Indes¹. — On ne signale aux Indes des gisements d'antimoine ayant quelque intérêt et quelque continuité que dans la zone himalayenne : en Afghanistan, au Nord de Killa Abdulla, avec valentinite ; dans le Punjab, district de Sighri, à une altitude de 4 500 m. On en retrouve à Ténasserim, dans le Sud de la Birmanie.

Tonkin² et **Chine**. — Au Tonkin, de nombreux filons d'antimoine, dont on ignore l'âge exact, ont été autrefois explorés sur la côte.

On en retrouve dans la zone de Mongtzé et plus au Nord, en Chine, dans la zone stannocuprifère du Yunnan septentrional.

Nous ne savons rien sur le gisement des importants filons antimonieux de Kiang-si, du Hounan, etc., que nous plaçons ici simplement par continuité géologique.

Japon. — Au Japon, l'antimoine est exploité principalement dans la région cuprifère de Saijo et de Besshi, dans l'île de Shikoku ; mais il apparaît, en outre, fréquemment dans des remplissages complexes à titre accessoire.

Vers l'extrémité Ouest de la grande île, la mine de *Kano*, qui a produit en 1907, 161 t. de stibine et 9 d'antimoine raffiné, contient des filons irréguliers de stibine encaissés dans les alternances de terrains primaires, grès schisteux, schistes, conglomérats, etc. Comme dans beaucoup de filons d'antimoine, la stibine est à peu près exempte de gangue.

¹ 1881. MALLET. *On a Specimen of native antimony obtained at Pulo-Obin, near Singapore of India* (Rec. geol. Sur., t. 14, p. 303). — 1885. CRIPER. *Note on some Antimony Deposits in the Maulmain district*. (Rec. geol. Sur. India, t. 18, p. 151).

² Coll. Ec. d. M., 1209 (Monkay).

La mine d'antimoine d'*Ichinokawa*, près de Besshi (fig. 119 et 120), qui a fourni de remarquables échantillons cristallisés, présente des filons de stibine avec un peu de pyrite et gangue quartzreuse dans des terrains primaires formés de schistes micacés, quartzites, schistes graphiteux, etc. avec des conglomérats : par conséquent, dans des conditions qui peuvent rappeler nos gites hercyniens du Plateau Central. Certaines masses de stibine ont une structure cristalline fine et compacte comme de l'acier, dont on leur a donné le nom. Ce filon est, d'après son plan que nous reproduisons, sinueux, ramifié par endroits, avec une

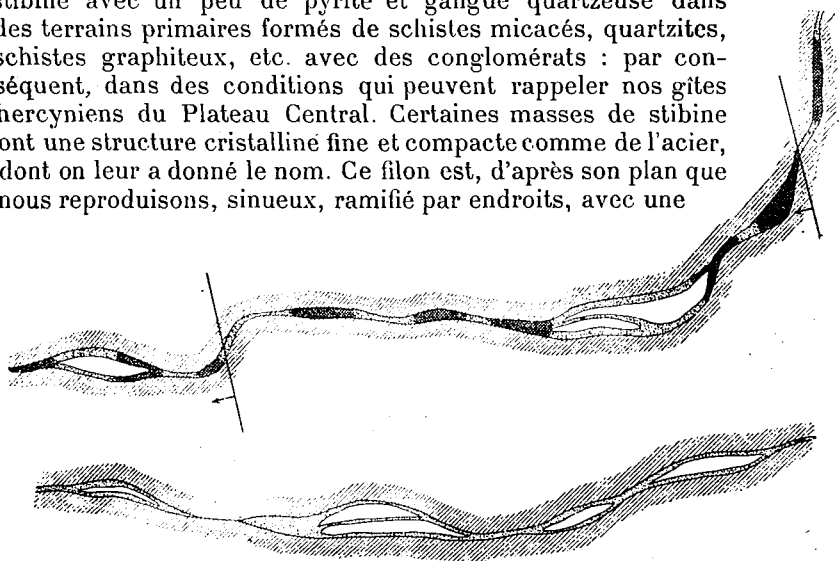


Fig. 119 et 120. — Coupes longitudinale et horizontale des mines d'Ichinokawa.

disposition lenticulaire des minerais qui n'est pas pour surprendre dans un filon de stibine. La mine produisait en 1897, plus de 850 t. de stibine.

Bornéo¹. — Bornéo était, il y a quelques années, une source importante d'antimoine. En 1881, on en a exporté pour une valeur de 1 800 000 fr.

Les principales mines sont, dans la partie anglaise, au Nord de l'île, à Sarawak, celles de Tambusan et Tagui. On en a retiré, outre la stibine, beaucoup d'oxyde d'antimoine, expédié en Angleterre, à Hambourg ou à Boston, pour être raffiné. On y trouve aussi de l'antimoine natif.

Les gisements se composent, d'après Gröger, de nids de stibine dans des filons de quartz, traversant des calcaires et argiloschistes au contact ou à proximité de porphyres.

Australie². — L'Australie présente, dans le New South Wales et la province de Victoria, d'assez nombreux gisements d'antimoine, dont plusieurs sont aurifères. Nous avons donné leur production plus haut.

On cite, dans le New South Wales, les filons de la Baie de Munga, près de la rivière de Macleay. Ils consistent en filons d'oxyde et sulfure traversant le dévonien. La gangue est quartzreuse. A Armidal, on y trouve un peu

¹ Coll. Ecole des Mines, 1520. — Voir 1876. GRÖGER. *Das Antimonwerk in Sarawack auf Borneo* (Ver. d. k. k. geol. Reichs., Wien, t. 4, p. 87) et d'ACHIARDI, t. 2, p. 588).

² 1875. LIVERSIDGE. *The Min. of N. S. Wales* (Tr. and proc. R. Soc., N. S. Wales, t. 9, p. 181). — 1876-77. S. HERBERT COX. *Report on Antimony mine, Endeavour. Queen Charlotte Sound, N. Z.* (G. S. of N. Z., Rep. of geol. exp. dur. 1874-76. Wellington).

d'or natif. Dans Victoria, le district important de Costerfield est également aurifère.

Mexique. — Il existe, d'après Cox¹, dans la Sonora, à 50 km. du golfe de Californie, d'importants filons de quartz et stibine, de 1 à 6 m. encaissés entre des quartzites et des calcaires, et présentant, aux affleurements, de grandes quantités d'oxyde.

2^o STIBINES AURIFÈRES

Le type des stibines aurifères est intéressant à rapprocher des mispickels aurifères si fréquents et sur lesquels l'attention a été beaucoup plus anciennement appelée.

Beaucoup de stibines, quand on les analyse avec soin, renferment des traces d'or. Souvent aussi les pyrites ou mispickels qui accompagnent la stibine sont aurifères et nous aurions pu allonger beaucoup la liste des gisements où l'on exploite à la fois l'antimoine et l'or : gisements qui passent progressivement à de véritables filons d'or avec un peu d'antimoine. Mais nous n'avons rangé ici que quelques gisements typiques, dans lesquels l'or a paru exploitable. D'autres, où l'or est en quantités trop faibles, ont été ou seront désignés dans les autres paragraphes.

Parmi ces gisements aurifères, beaucoup semblent se rattacher aux venues primaires que nous avons surtout étudiées jusqu'ici : venues, dans lesquelles la stibine n'est accompagnée que de pyrite ou de mispickel (Portugal, la Lucette, Transvaal, etc.). Cependant nous trouverons aussi de l'or dans des filons complexes : parfois avec du cuivre (bournonite ou cuivre gris), comme dans le Fichtelgebirge ; ailleurs, dans des filons auro-argentifères tertiaires, où l'antimoine intervient comme peuvent le faire le sélénium, le tellure, etc.

En moyenne, il semble que l'or y ait subi sa concentration ordinaire dans les zones hautes, en sorte que plusieurs de ces gisements, exploités jadis pour or, ont dû être ensuite abandonnés.

Le long de la chaîne hercynienne d'Europe, que nous avons déjà parcourue, nous trouvons quelques gisements de stibine aurifère intéressants.

Portugal. — En Portugal, nous avons signalé la présence fréquente de l'or dans les stibines du Bassin du Douro².

La Lucette (Mayenne)³. — Cette mine présente quelque intérêt comme étant aujourd'hui le principal producteur d'antimoine et d'or en France. Le gisement, situé près du bourg du Genest à 20 km. Ouest de Laval, est constitué par des filons quartzeux à pendage presque vertical, encaissés au milieu de quartzites et de schistes du silurien supérieur. Le minerai est de la stibine, avec de la pyrite qui, une fois préparée, tient 25 à 30 gr. d'or à la tonne. On exploite surtout les filons Georges et l'on a commencé à

¹ 1880. Am. Journ., 20, 419, 421. — Cf. D'ACHIARDI, t. 2, p. 590.

² Tome 1, p. 748.

³ 1904. MICHEL. *Sur les mines de la Lucette* (Bull. Soc. Min., t. 27, p. 79). — 1909. *Les mines d'or en France* (La Nature, 2 oct.). — Coll. Ec. d. M., 206. — Feuille de Laval.

attaquer les filons Sainte-Barbe. La Société, constituée en 1904 a produit : en 1906, 223 kg. d'or fin (dont 162 dans les pyrites exportées); 300 kg. en 1907; 738 kg en 1908, avec 10 000 t. de minerais d'antimoine. En 1909, on a atteint 13 630 t. de minerais d'antimoine rendant 1 929 t. de produits antimonieux et 486 kg. d'or.

On traite sur place : d'un côté les stibines, de l'autre des quartz aurifères pauvres à 6 gr. d'or par tonne et l'on expédie à Swansea les pyrites aurifères (à teneur de 35 gr. en 1906).

Goldkronach (Fichtelgebirge)¹. — Dans les schistes à sérécite cambriens, on a exploité au xiv^e siècle, pour or, des filons complexes renfermant de la stibine, du mispickel aurifère avec or natif, de la blende, de la bournonite, etc., dans une gangue de quartz avec calcite et braunspath et un peu de barytine. Les minerais sont disséminés dans le quartz en fine poussière.

Egalement, dans le Fichtelgebirge, les filons antimonieux et aurifères de Böhmisdorf et de Wolfsgalgen près *Schleiz*, recoupent des schistes siluriens (quartz et stibine avec blende, cuivre gris, pyrophyllite et sidérose).

Krasnahora et Mileschau (Bohême)². — Au S. W de Prague, des filons de stibine aurifère, très anciennement connus, sont au voisinage de filons de lamprophyre et de porphyre traversant les schistes. Dans une gangue de quartz avec un peu de calcite, on a de la stibine, du mispickel et de la pyrite, le tout assez fortement aurifère, avec des grains et des feuilles d'or natif. On a trouvé parfois des masses de stibine, de près de 1 m. Un peu d'antimoine natif a été signalé comme curiosité.

L'exploitation des mines de Mileschau a eu lieu pour or au xiv^e siècle, sans doute sur des enrichissements secondaires superficiels. De notre temps, on exploite pour antimoine jusqu'à 250 m. de profondeur; mais le minerai tient encore en moyenne 31 gr. d'or par tonne et, de 1893 à 1900, on a pu extraire 372 kg. d'or.

Magurka, Kremnitz (Hongrie). — On connaît, en Hongrie, au moins deux groupes de gisements antimonieux : l'un dans la région du Tatra au Nord; l'autre dans la Transylvanie au S.E. Tous deux semblent d'âge tertiaire et contiennent un remplissage complexe. Quelques-uns sont assez notablement aurifères : par exemple ceux de Magurka et de Kremnitz, où l'on a trouvé, comme nous le dirons, de beaux cristaux d'or natif. Nous les décrirons au paragraphe 4^o.

Afrique du Sud. — Au *Transvaal*, il existe quelques beaux filons de stibine aurifère, ayant présenté dans leurs parties hautes des grains ou cristaux d'or natif. On en a cité dans le *Swaziland*, à *Gravelotte*, dans le *Murchison Range*, etc. et l'on a tenté, sur eux, quelques exploitations, qui ont donné des résultats très irréguliers.

¹ 1894. SANDBERGER. *Ueber die Erzlagerstätte von Goldkronach bei Berneck* (Sitzb. d. mat. phys. Cl. bay. Ak., t. 24, fasc. 2). — 1907. SCHMIDT. *Die Goldgewinnung im Fichtelgebirge* (avec historique et bibl.) (Z. f. d. B. H. u. S. W. des preuss. St., t. 55).

² 1874. HELMHACKER. *Der Antimonbergbau Milesov bei Krasnahora*. — 1895. POSZEPNY. *Goldvorkommen Böhmens* (Arch. f. pr. G., t. 2, p. 165). — 1906. S. METZL. *Antimon und golderz. Bergbau in Proutkowitz, Podmok, Schönberg, bei Selčan* (Erzbergbau).

De la stibine non aurifère se trouve également en filon dans des amphibolites, près de *Forbesreef*, dans le Swaziland.

Enfin le cuivre gris antimonieux est assez fréquemment représenté dans le même pays.

Australie. — Nous nous contentons ici de rappeler l'existence, signalée plus haut¹, de stibines aurifères exploitées pour or dans les provinces de Victoria et du Queensland (Armidal, Costerfield). A Costerfield, les concentrés à 40-50 p. 100 d'antimoine tiennent 50 à 60 gr. d'or à la tonne.

Idaho. — Un autre exemple de stibine aurifère se trouve dans l'Idaho, près de Burke (C¹⁶ de Shoshone)². On y a exploité jusqu'à 100 m. de profondeur un filon irrégulier variant de 1,50 m. à 6 m., où le minerai forme des lentilles et des colonnes dans le quartz. La stibine renfermait jusqu'à 100 gr. d'or par tonne.

Bolivie. — On retrouve l'or avec la stibine dans le remplissage complexe des filons boliviens, qui sont à la fois, comme nous le verrons³, cupro-argentifères et stannifères, en relation possible avec des roches éruptives tertiaires.

A Aguas Calientes, on signale de l'or natif. A Huanchaca, il existe de la stibine et des traces d'or dans un remplissage de cuivre gris argentifère, blende, galène, pyrites de fer et de cuivre.

Pérou. — Au Pérou, nous étudierons plus tard l'association de l'or avec l'antimoine, le cuivre et l'argent dans les filons tertiaires d'Huancavelica, Carabaya, etc.⁴.

3° ASSOCIATION DE L'ANTIMOINE ET DU CUIVRE.

Nous avons signalé, comme des exceptions, des sulfo-antimoniures de cuivre, tel que la wolfsbergite et la famatinite. Il y a quelques années, on exploitait, en Asie Mineure, en face Mételin, un antimonieux semblable, tenant 27 p. 100 d'antimoine et 73 p. 100 de cuivre.

Mais l'association de l'antimoine et du cuivre est représentée surtout par le groupe si important des cuivres gris, dont la description trouvera plus naturellement sa place quand il sera question du cuivre.

Citons seulement : en Algérie, les cuivres gris argentifères de Mouzaïa etc., accompagnés de barytine et sidérose ; ceux de la Sierra Nevada associés avec de la sidérose ; ceux de Bosnie contenant cuivre gris antimonieux, sidérose et barytine, parfois avec cinabre ; ceux de Recuay (Pérou), avec cuivre gris antimonieux, galène antimoniale et bournonite (sulfo-antimonieux de plomb et cuivre), argent rouge, pyrites de fer et de cuivre.

Le plus souvent, l'association antimoine et cuivre, à l'état de cuivre gris, entraîne, en même temps, la présence de l'argent, parfois aussi celle de l'or.

¹ Tome 1, page 760.

² Voir plus haut, tome 1, page 741.

³ Tome 2, pages 69 à 74.

⁴ Tome 1, page 767.

Exceptionnellement, elle peut amener le rapprochement de l'antimoine et de l'étain : par exemple, à Oruro, en Bolivie, où l'on a cuivre gris, argent rouge, stibine et cassitérite.

Plus souvent le zinc, qui intervient déjà dans la panabase, devient assez abondant pour donner de la blende (Magurka, Schemnitz, Huanchaca, etc.).

Parfois aussi le plomb intervient : soit à l'état de bournonite associé avec le cuivre et le plomb ; soit en boulangérite ou jamesonite, uni seulement avec le plomb. Ainsi, à Gladhammar, près de Westervik, en Suède, on trouve, avec du cuivre et du cobalt, l'association du plomb et de l'antimoine sous la forme de boulangérite.

On est ainsi amené, par les remplissages complexes, à des types où intervient, comme nous le verrons plus loin, le mercure, soit en cuivre gris mercuriel (Schwartzite), soit même en cinabre.

Nous ferons, à ce sujet, une remarque générale. Le développement des cuivres gris paraît souvent, dans les filons cuprifères, une forme presque superficielle, associée, dans la zone de cémentation, avec le développement également superficiel de la sidérose et de la baryline ; et souvent de tels gisements, quand on s'y enfonce, passent à des chalcopyrites. On est donc amené à supposer, pour l'antimoine, une concentration secondaire analogue à celle que nous imaginons pour le baryum, le manganèse, le cobalt, etc., et le processus de cette concentration superficielle, par laquelle est mis en évidence si manifeste un corps qu'on ne soupçonne pas en profondeur, soulève, pour l'antimoine, le même problème que pour les autres corps dont nous le rapprochons à cette occasion.

Les gisements cupro-antimonieux peuvent enfin renfermer assez d'antimoine pour que celui-ci ne se présente pas seulement dans des combinaisons complexes, mais en stibine même. On a ainsi de la stibine avec de la chalcopyrite, comme avec de la pyrite de fer ou de mispickel, et souvent, en même temps, du cuivre gris.

Nous trouverons de tels cas de remplissages complexes à Magurka ou Schemnitz en Hongrie, à Huanchaca en Bolivie, avec proportion de zinc assez forte pour donner, outre la panabase zincifère, de la blende.

Dans le Harz, on a travaillé près de Wolfsberg, un filon complexe de quartz, calcite, stibine, cuivre gris (federerz) dans les schistes dévoniens.

4° ASSOCIATION DE L'ANTIMOINE AVEC LE PLOMB ET AVEC L'ARGENT.

Nous avons déjà vu s'amorcer ces deux associations dans quelques-uns des cas signalés plus haut pour le cuivre ; mais elles deviennent plus typiques dans quelques gisements complexes se rattachant aux groupes ordinaires des filons plombifères et où le cuivre n'intervient plus que comme un élément subordonné. Certains de ces gisements sont, comme nous allons le voir, d'âge tertiaire et peuvent donc être considérés en moyenne comme représentant une forme de métallisation plus voisine de la surface que ceux où la stibine est seule ou avec la pyrite. Ce caractère s'accroît dans un grand nombre de filons que nous décrirons dans un paragraphe spécial, bien qu'ils soient en général eux aussi plombifères, parce que le mercure s'y présente comme trait caractéristique. Les gisements com-

plexes, où le mercure n'intervient pas, sont, au contraire, pour la plupart, de peu d'importance. On y remarque plutôt la présence du plomb que celle du zinc. Parfois l'argent s'y développe et il nous a paru difficile de distinguer les gisements où l'on a du plomb argentifère de ceux où l'argent s'isole en minéraux proprement dits.

La combinaison directe du plomb et de l'antimoine donne lieu à quelques minerais précédemment cités, tels que la galène antimonieuse, la boulangérite, la jamesonite, la bournonite, la nadorite. Ceux-ci constituent parfois de véritables gisements, auxquels peut s'associer la stibine.

D'autre part, les polybasites, psaturoses, pyrargyrites, etc. forment des groupements bien connus d'argent et d'antimoine, qui se présentent parfois avec les précédents. La même observation, que nous avons faite pour les cuivres gris, se répète également pour les minerais argentifères antimonieux. Très fréquemment, la concentration de l'argent et de l'antimoine est un phénomène localisé dans la zone de cémentation superficielle et tendant à disparaître en profondeur. Ainsi à *Hien de la Encina*, où l'on a pyrargyrite avec barytine, sidérose et quartz, à *Chañarcillo*, à *Caracoles*, en divers points du Mexique, du Pérou, etc., etc.

France. — En France, nous avons déjà signalé les filons complexes de *Freydenet*, où l'on a exploité un moment la boulangérite¹.

A la *Tourche* (Ille-et-Vilaine) il y a un peu de stibine avec de la galène.

Suède. — En Suède, la mine de *Sala* fournit de la stibine, avec un peu d'antimoine natif, associée à des minerais de plomb très argentifères, dans des filons qui recourent le calcaire primitif et que nous décrirons au chapitre du Plomb.

A *Gladhammar*, près de Westervik, on trouve de la boulangérite dans des filons de cobalt et de cuivre.

Saxe. — Près de *Freiberg* en Saxe, les filons de Mobendorf, Cunnersdorf, Seifersdorf, qui ont été exploités autrefois, renferment de la stibine dans un remplissage complexe de bournonite, berthiérite, pyrite et quartz. Un peu plus à l'E.S.E., à Bräunsdorf, les mêmes minerais apparaissent avec des minerais d'argent.

Hongrie (*Magurka, Felsobanya, etc.*)². — Les deux grandes régions métallifères de la Hongrie, déjà signalées plus haut à l'occasion des stibines aurifères³, comprennent toutes deux de la stibine dans des remplissages complexes d'âge probablement tertiaire.

Tout d'abord, au Sud du Tatra, on trouve Magurka, mine domaniale d'antimoine et d'or, sur le versant Nord de la chaîne granitique de 1 200 à 1 800 m. de hauteur, qui sépare les comitats de Sohl et de Liptau, en même temps que les bassins hydrographiques de la Gran et de la Waag. Le granite y contient plusieurs filons de stibine, quartz et or natif dans un remplissage complexe plombo-cuprifère. L'un de ces filons, seul

¹ Tome 1, page 754.

² Coll. Ecole des Mines, 1202 (Iglo); 1314 (Brieser Mauth); 1424 (Lubella). — 1861. CORTA (B. u. H. Z., p. 123). — 1868. MEIER (Jahrb. d. KK. geol. Reichst., p. 257).

³ Tome 1, page 762.

exploité, a jusqu'à 4 m. de puissance; son inclinaison, très variable, descend parfois jusqu'à 25 ou 35 degrés. Plusieurs failles transversales y produisent des rejets importants. Au voisinage du filon, le granite a pris un aspect spécial que l'on retrouve souvent près des gites d'antimoine. Le feldspath est transformé en un minéral jaune verdâtre, d'aspect cirieux et le mica noir est devenu blanc.

Le remplissage consiste principalement en quartz et stibine; le quartz contient de fines imprégnations, des fils et des grains d'or argentifère. Comme éléments accessoires, on trouve de la galène, de la blende, de la pyrite, de la chalcopryrite, du braunspath et de la calcite. Aux points les plus riches, la stibine a 2 m. de puissance; mais elle diminue ensuite très rapidement.

En plan, on peut remarquer que, dans le filon primitif composé de quartz avec axe de stibine, il s'est fait, le long d'une éponte, une réouverture ayant amené du braunspath.

Un peu plus au Sud, près de Bries, les filons d'antimoine de *Birztra* et *Botza* sont également dans le granite. Enfin, vers le S. W., on arrive au district argentifère de *Kremnitz* et *Schemnitz*, qui contient également de l'antimoine.

A Kremnitz, on a distingué deux systèmes de filons: l'un de pyrite, cuivre gris, argent rouge, etc., avec imprégnation de pyrite aurifère et argentifère dans les roches encaissantes; l'autre contenant, outre le même remplissage, de la stibine aurifère et de l'or natif.

A l'autre bout de la Hongrie, on peut citer *Felsobanya* en Transylvanie, où il existe, à la limite d'un trachyte amphibolique et d'un trachyte plus récent, un conglomérat de frottement métallisé, qui contient du quartz avec de la pyrite, souvent du réalgar et de la stibine, avec galène, blende, argyrose, etc. V. Groddeck¹ a fait remarquer la présence de tables de barytine enveloppant des baguettes de stibine et a signalé ce fait comme une preuve entre mille que les filons n'avaient pu se former par fusion (la stibine étant, comme on sait, très fusible).

Algérie. — En Algérie, l'antimoine existe, comme nous le verrons bientôt², dans des remplissages complexes, où l'on a trouvé (Hammam N'Bail) une combinaison spéciale d'antimoine et de plomb, la nado-rite, avec de la calamine.

Etats-Unis. — De même, aux Etats-Unis, on exploite de la jamesonite dans les *Black hills* du Dakota.

Pérou³. — On peut rattacher à ce type les filons d'antimoine du Pérou.

L'antimoine est un élément assez fréquent dans les métallisations complexes riches en argent, qui dominant le long des diverses chaînes tertiaires à manifestations éruptives récentes, comme la chaîne des Andes, le Japon, etc. C'est ainsi que, dans divers filons du Pérou, on a signalé, non seulement les cuivres gris, les argents rouges antimonieux, les bour-

¹ GRODDECK, p. 224 et 398.

² Tome 1, page 770.

³ 1908. WECWARTH. *El antimonio en el Peru* (Bol. Cuerpo Ing. Minas Peru, 68).

nonites, qui correspondent d'ordinaire à une concentration de l'antimoine dans la zone de cémentation, mais aussi la stibine isolée. On cite : dans le département de *Cajamarca*, les filons de San Felipe dispersés dans un grès métamorphique avec pyrite et blende ; dans celui de *la Libertad*, le Cero Negro de Huamachuco ; dans celui d'*Ancachs*, un assez grand nombre de stibines argentifères, telles que celles de Recuay tenant 400 gr. d'argent par tonne, ou celle d'*Uchutchacua* (Cajatambo), où les teneurs vont de 200 à 500 gr. d'argent.

Dans celui d'*Huancavelica*, presque tous les filons argentifères sont, en même temps, antimonieux : l'antimoine, y étant ou libre ou combiné avec le cuivre, l'argent, etc. On considère là que la présence de l'antimoine annonce celle de l'or natif. Au filon la Caudalosa, on a de la stibine à 125 gr. d'argent avec galène, blende, bournonite, pyrite et tétraédrite, dans une gangue de quartz et barytine.

Dans le département de *Cuzco*, à Chimboya, un filon de 1 m. de large contient de la stibine à traces d'argent avec pyrite, galène et quartz. Quand la proportion de stibine augmente, celle de silice semble s'accroître en même temps. Les mines de Canchis (La Raya) ont produit, de 1900 à 1906, environ 600 t. de stibine à 55-65 p. 100. Enfin, dans le département de *Puno*, on travaille à la mine San Antonio de Esquilache (Cercado). Les filons d'or de Santo Domingo (*Carabaya*) contiennent également de la stibine.

La galène antimonieuse est aussi très fréquente au Pérou.

5° ASSOCIATION DE L'ANTIMOINE ET DU MERCURE

Il existe un grand nombre de gisements complexes, où le mercure se présente avec l'antimoine. Dans beaucoup des gisements qui vont être cités à ce propos, le mercure est peu abondant ; sa présence peut néanmoins être considérée comme un élément assez caractéristique pour signaler à lui seul des types métallogéniques bien définis et presque toujours, des types tertiaires, contrastant avec les types hercyniens étudiés au paragraphe 1° et 2°¹.

On trouve alors la stibine à gangue quartzreuse avec du cinabre, parfois du réalgar ou de l'or piment, de la pyrite de fer, des hydrocarbures ou du graphite et, accessoirement, des minerais de cuivre antimonieux, c'est-à-dire des cuivres gris (tétraédrite).

L'une des zones où l'on observe le mieux cette association est celle des plissements circum-méditerranéens, dans la Sierra Nevada, les Alpes, les Apennins, les Carpathes, la Bosnie, l'Atlas, etc.

Sierra Nevada. — Sur le flanc Sud de la Sierra Nevada (province de Grenade), le cinabre apparaît avec cuivre gris, sulfures de nickel et de cobalt.

¹ Il importe d'être en garde contre une erreur de détermination minéralogique qui ferait prendre, pour du cinabre, dans certains gites d'antimoine, de petites mouches rouges de kermès (oxysulfure d'antimoine). A côté du groupement mercure-antimoine, on peut signaler celui mercure-arsenic (réalgar, or piment, mispickel) : par exemple à Mieres (Asturies), à Huancavelica (Pérou), au Kouei-tchéou, en Chine, etc.

Palatinat. — Dans le Palatinat, le cinabre est associé avec pyrite, stibine, matières bitumineuses.

Toscane¹. — En *Toscane*, les deux métaux connexes, antimoine et mercure, forment des

gites d'une réelle importance industrielle, considérés par B. Lotti, qui leur a consacré une description spéciale, comme du début du quaternaire et reliés à la fin des éruptions trachytiques et andésitiques du pays².

A l'Ouest de Sienna, près de Montarrenti, se trouve la petite mine prospère de *Cettine di Cotorniano*² ou *Rosia*, qui exploite des poches de stibine avec quartz, calcite et traces de réalgar au contact du permien dans un calcaire caverneux silicifié (rhétien suivant Toso, éocène pour Lotti), où les réactions secondaires ont amené la présence du gypse (fig. 92). En tant que gisement de contact dans les calcaires, ce gîte est tout à fait à rapprocher de ceux de Kostainik en Serbie et Allchar en Macédoine³.

A *Pari*, près de Sienna, le quartz concrétionné avec noyaux et filonnets de stibine, irréguliers comme toujours,

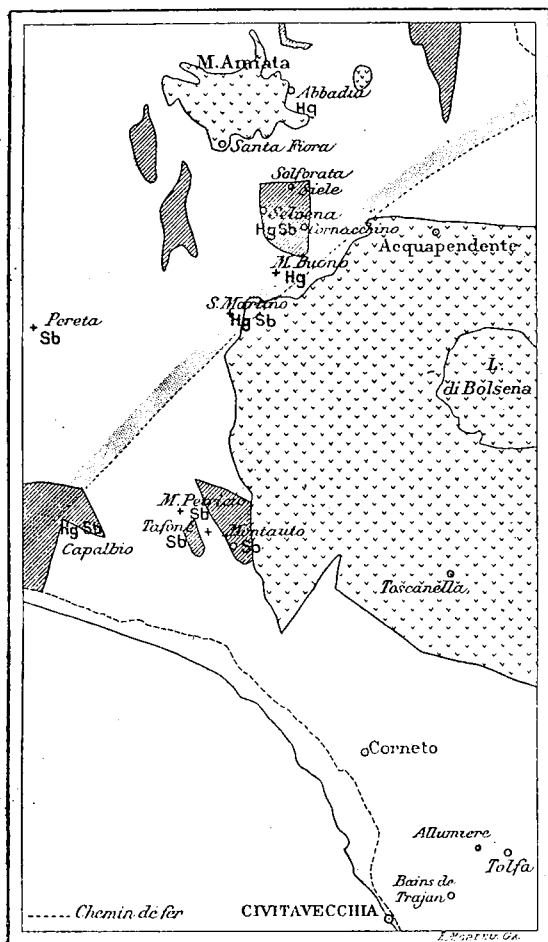


Fig. 121. — Carte de la Toscane minière au 1/785 000^e, montrant la répartition de l'antimoine et du mercure.

¹ Coll. Ec. d. M., 1729 (Rosia). — 1845. BURAT. *Gites métallifères*, 275. — 1848. COQUAND. *Descr. des solfatares, des alunières et des lagoni de la Toscane* (B. S. G. F., 2^e, t. 6, p. 91). — 1872. D'ACHIARDI. *Mineralogia della Toscana*. — 1879. PANTANELLI. *Nuova miniera d'antimonio nella prov. di Siena* (Soc. Tosc. Sc. Nat., t. 2, p. 4). — 1894. TOSO (Revista del serv. miner., p. 127 et 1899, p. 166). — 1901. LOTTI. *Die Zinnober und Antimon führ. Lag. Toscanas* (Z. f. pr. G., fév. p. 41 à 46).

² Z. f. pr. G., fév. 1901. — Voir la fig. 92, t. 1, p. 626, qui complète la fig. 121 vers le Nord

³ Voir plus loin, tome 1, p. 774.

traverse des argiles et schistes micacés au contact du permien et de l'éocène.

Vers l'Est, on retrouve divers gisements d'antimoine dans la zone mercurielle qui se trouve au Sud du Monte Amiata et à l'Ouest du lac Bolsena, à Selvena, San Martino, Pereta, Capalbio, M. Petriccio, Tafone, Montauto, etc. (fig. 121), où l'antimoine domine, mais en s'accompagnant fréquemment de traces de mercure.

A *Pereta*, la stibine, avec soufre natif, est en agrégats dans les géodes d'un dyke quartzeux, ou en veinules dans ses fissures.

Au milieu de la zone de l'alberese, c'est-à-dire des calcaires de l'oligocène inférieur¹, on trouve là une masse irrégulière de calcédoine avec des nids de stibine. Les roches encaissantes ont subi un métamorphisme assez actif et sont imprégnées d'émanations sulfureuses, qui ont transformé l'alberese, en partie, en gypse et anhydrite. Il n'est d'ailleurs pas certain que l'antimoine soit en relation avec ces vapeurs de soufre.

A la stibine sont associés des minéraux oxydés.

Plus à l'Est, à *Selvena*, le cinabre avec stibine, réalgar et pyrite, se trouve dans des bancs d'argile noire bitumineuse intercalés entre les calcaires du lias.

A *San Martino*, la stibine se présente en mouches avec calcite et fluorine dans une masse de calcaire cristallin séparée des couches éocènes par une mince salbande cinabrifère.

A *Pescia Fiorentina*, la stibine en noyaux rayonnants avec soufre natif accompagne le cinabre dans des calcaires éocènes; près de là, à *Montauto*, dans la vallée de Tafone, on observe, au contact du calcaire éocène et du permien, du quartz concrétionné avec des houppes de stibine.

Corse². — On a exploité un moment avec activité, à la pointe Nord de la Corse, entre Bastia et le Cap Corse (*Luri, Meria, Ersa*) des filons E.-W. de quartz et stibine³, parfois mélangés de pyrite, plus rarement de blende, de bournonite, et même de cinabre à Meria.

Ces gisements s'encaissent dans les schistes anciens, et Nentien les a regardés en conséquence comme antérieurs aux serpentines présiluriennes: opinion qui nous semble discutable, la relation avec le système de cassures récentes étudié plus haut en Toscane présentant d'autre part quelque vraisemblance.

A *Meria*, la minéralisation comprend parfois (San Martino) une zone de calcite sur l'éponte, puis de la stibine avec des noyaux de quartz enveloppés par de la calcite et des traînées de blende. Il existe, en outre, un peu de cinabre et de bournonite. Généralement, la minéralisation ne dépasse pas 8 à 12 cm.; mais, par endroits, on a trouvé une colonne massive sur 50 m. de long.

¹ L'alberese, qui surmonte les *argile scagliose*, a été souvent classé en haut de l'éocène.

² Coll. Ec. d. M., 1210 (Meria); 1721 (Cranagiolo); 2203 (Luri Castello); 2233 (Ersa). — *Gîtes métall.*, t. 2, p. 241. — 1897. NENTHEN. *Etude sur la Const. géol. de la Corse*, 223 p. (p. 124), et *Etude sur les gîtes minéraux de Corse* (Ann. d. M., t. 12, 9^e liv. de 1897).

³ La production annuelle moyenne de minerai d'antimoine à 50 p. 400 a été d'environ 1 500 tonnes.

A *Luri Castello*, on a exploré un filon minéralisé de 300 m. de long, ayant présenté un moment une zone massive de 1 m., branchée en deux un peu plus bas.

D'autre part, à *Matra*, district de Moita, on connaît, au milieu de la serpentine, un filon, parfois bréchiforme et parfois concrétionné, de réalgar, or piment, stibine et dolomie, dont nous avons parlé à l'occasion du réalgar¹.

Hongrie, Bosnie, etc. — En Hongrie, certains gisements (Dobsina, Szlana, Kotterbach, Metzenseifen, etc.) renferment de la tétraédrite mercurielle avec cinabre, pyrite, stibine, quartz et barytine.

Le district de *Rechnitz*, en Hongrie², dans le comitat d'Eisenburg, présente, au milieu de schistes graphiteux, chloriteux, micacés et calcari-fères, des filons d'antimoine ayant quelque importance industrielle et qu'on a pu suivre sur 3 km. Le gisement principal est formé de quartz, calcite, stibine et pyrite tenant 0,0021 p. 100 d'or; mais les schistes graphiteux au contact sont, sur 3 à 20 m. de large, imprégnés de pyrite avec de petits nids de cinabre en quantité utilisable. La minéralisation est parfois noduleuse et parfois feuilletée.

On a exploité, en Haute-Hongrie, à *Aranyidke* et *Rosenau*, d'autres filons complexes renfermant de l'antimoine sous la forme de jamesonite dans une gangue de quartz et carbonates, avec berthièrite, blendé et un peu d'or.

En *Bosnie*, on a exploré, près de *Prozor*, des groupes de filons renfermant : les uns, cuivre gris, cinabre et barytine; d'autres, stibine et cinabre; d'autres, presque exclusivement stibine.

A *Cemernitz-Zahor*³, on peut suivre, sur plusieurs kilomètres de long, des filons très nets renfermant souvent une zone centrale de stibine et quartz avec lien argileux, puis de l'hématite cinabrifère, du quartz et de la stibine. L'un de ces filons renfermait des blends claires et sombres, de la pyrite et un peu de sidérite.

Ces minerais semblent, comme ceux de Toscane, en relation avec des venues trachytiques. Aux affleurements, ils ont donné de la sénarmonite. On connaît également, près de *Kresevo* (30 km. de Serajevo), des tétraédrites mercurielles.

Ailleurs, on trouve dans le *Frioul*, dans le *Kleinkogel* (S.-W. de Brixlegg), l'association du cinabre et de la tétraédrite, souvent avec barytine.

Afrique du Nord (Djebel Taya, Hammam-N'Bail, Dj. Hamimat, etc.)⁴. — La région Nord-Africaine présente, du Maroc à la Tunisie, d'assez

¹ Tome 1, page 737.

² 1898. (Z. f. pr. G., pr. 433 et 434).

³ 1895. BORDEAUX. *Les venues trachytiques et les gites métal. de la Bosnie* (Rev. univ. des Mines, t. 30, p. 254-279).

⁴ L. DE LAUNAY. *Rich. min. de l'Afrique*, p. 154 et 343. — 1910. DUSSERT. *Etudes sur les gisements métallif. de l'Algérie*, 180 p. et 4 pl. (Ann. d. M., janv. et fév.; complété pour le fer en 1942, 11^e sér., t. 1, p. 69 à 133). — En 1897, le Dj. Taya avait atteint un moment 731 t. de minéral par an. De 1904 à 1910, la hausse de l'antimoine a fait reprendre les principales mines algériennes (Taya, Hammam, N'Bail, Hamimat); mais on n'en a tiré au total que 540 t. de stibine (160 000 fr.) et 1150 t. de sénarmonite et valentinite (190 000 fr.).

nombreux gisements antimonieux reliés aux mouvements tertiaires.

La stibine et ses produits d'altération y sont, contrairement à ce que nous avons vu dans nos chaînes hercyniennes carbonifères de l'Europe centrale, mais conformément au type que nous étudions en ce moment, assez fréquemment associés aux autres sulfures de plomb, zinc, cuivre, ou même mercure. En même temps, on les trouve dans des filons proprement dits, souvent éloignés des roches éruptives, tandis que, dans le Plateau Central, où la stibine à gangue quartzreuse n'est guère accompagnée que de mispickel, sa relation avec certaines granulites ou microgranulites est très intime. Nous voyons là un type moins profond, moins érodé, de métallisation.

L'association stibine et cuivre gris (parfois avec cinabre) est représentée en Algérie par quelques exemples intéressants, où le cinabre s'associe parfois avec la stibine, formant une gaine autour des baguettes de ce minéral. Mais la même zone offre surtout le groupement cuivre et antimoine sous la forme des cuivres gris antimonieux (Tenès, Mouzaïa, Bougie, etc.).

Ajoutons, d'ailleurs, que la stibine algérienne, par suite de son encaissement fréquent dans des terrains calcaires fissurés, accessibles à la circulation des eaux, très au-dessus du niveau hydrostatique, a subi, dans certains de ses gisements, des remises en mouvement, que nous allons étudier à propos du Djebel Hamimat et qui ont eu pour résultat de constituer des dépôts secondaires d'antimoine oxydé, auxquels on a parfois attribué une origine sédimentaire primitive.

C'est un caractère qui n'est pas spécial à l'antimoine, mais qui se retrouve également, dans ce pays même, pour d'autres métaux, dont l'état fréquent d'oxydation tient à la fois au relief du sol et au climat.

En partant de l'Ouest, on trouve, d'abord au *Maroc*, les gisements d'*Anjerah*, non loin de Tanger, de *Ziaidah*, entre Rabat et Casa Blanca, sur la côte Ouest, de *Kenatsa*, du côté de Figuig. L'antimoine y paraît assez souvent associé avec le plomb.

En *Algérie*¹, bien que les traces de stibine soient relativement fréquentes, ce minéral ne prend d'importance réelle et ne devient exploitable que dans une zone assez localisée, entre Constantine, Souk-Arphas et Aïn-Beïda, où le cinabre se développe en même temps que l'antimoine.

Le principal gisement de cette région est le *Djebel Taya*, concédé pour antimoine, à 31 km. Ouest de Guelma et au Sud du petit gisement de mercure de Ras-el-Ma, près d'Hammam-Meskoutine.

Ce gisement de stibine avec galène et cinabre accessoires, et épigénies de stiblite, remplit de minces fissures verticales, ou des joints de stratification dans des calcaires barrémiens, près de leur contact avec des marnes et, dans ce contact même, il existe des boules radiées de stibine atteignant 200 kg. Au lieu d'avoir une gangue exclusivement quartzreuse comme les gîtes du Plateau Central, à cristallisation plus ancienne et probablement plus profonde, cette stibine tertiaire est accompagnée, non seulement de quartz, mais aussi de calcite et de barytine : gangues que nous sommes habitués à voir souvent cesser quand on s'approfondit.

¹ Coll. Ec. d. M. 1427 (Aïn-Babouch) ; 1428 (Tebitga) ; 1435 (El Gresa) ; 1590 (Nador) ; 2383 (Djebel Taya). — Voir DUBERT, *loc. cit.*, p. 160. — Je me contente de signaler l'existence d'un filon de stibine dans les micaschistes à *Oued-Begra* près Bône.

Vers l'Est, le gisement inexploré de *Djebel-Bebar* (10 km. N.-W. de Guelma) est également curieux par l'association de stibine, cinabre et calamine, avec gangue de quartz et de barytine, dans des poches du calcaire néocomien. Il existe là, nous l'avons vu¹, des filons de phosphorite associés aux filons calaminaires, filons qui se sont peut-être formés par le remaniement des phosphates suessoniens sédimentaires, au moment de la remise en mouvement métamorphique, par laquelle la calamine a été substituée à la blende.

Un peu plus au N.-E, à *Oued-Ali*, près Enchir-Saïd (16 km. N.-N.-W. de Guelma), le calcaire sénonien à Inocéramus présente aussi des fissures incrustées de stibine (en partie oxydée), avec cinabre.

A *Bou-Zitoun* (6 km. N. de Guelma), on a exploré, en 1899, des poches de calamine, avec stibine et barytine, dans les calcaires urgo-aptiens.

Puis, à l'Est de Guelma et au Sud de Duvivier, vient le curieux ensemble du *Djebel Nador* et de *Hammam-N'Bail*.

Cette concession de *Hammam-N'Bail*, ou *Nador*² (23 km. E. ; 40° S. de Guelma), activement exploitée pour zinc, est surtout connue par les minéralogistes en raison de la présence d'une espèce minérale très rare, un chloro-antimoniote de plomb, dit *nadorite*, qui est là associé avec d'autres produits d'oxydation superficiels. La calamine pauvre, qui domine, y forme un amas, estimé à 300 000 t., entre des argiles à gypse et des travertins du miocène supérieur.

L'épaisseur du principal amas a varié, en s'enfonçant, de 12 à 25 m. Aux affleurements il était formé surtout de calamine ferrugineuse (*smithsonite*), avec galène, cérusite, mimétèse et *nadorite*. Vers 70 m. de profondeur, on a eu, au Nord, une colonne de calamine pauvre, peu antimonieuse et, au Sud, de l'antimoniote de fer.

Enfin le même groupement complexe se retrouve dans les gites de *Djebel-Hamimat* et *Sidi-Rgheiss* (60 km. S.-W. de Guelma, 23 km. N. 30° W. d'Aïn Beida).

Ce gisement de *Djebel Hamimat*, remarquable par la prédominance de la sénarmontite, qui y a été découverte par Sénarmont et décrit autrefois par Coquand, se trouve dans des alternances de calcaires noirs et de marnes schisteuses, bitumineuses, appartenant au gault d'après Blayac. Il se compose d'une association d'antimoine oxydé (*sénarmontite*), avec un peu de stibine, de calamine antimonieuse et faiblement plumbeuse et de cinabre, où Coquand avait voulu voir un dépôt sédimentaire d'antimoine oxydé, mais dont le caractère remanié est prouvé, tant par la présence d'un résidu de stibine avec commencement d'oxydation que par l'existence connexe de la calamine³.

¹ Tome 1, page 708.

² 1851. SÉNARMONT. *Ann. de phys. et de ch.*, t. 21, p. 504 et DANA (American journal of Science, 12, 209). — 1852. COQUAND. *Sur les mines d'antimoine oxydé des environs de Sidi-Rgheiss, au sud-est de Constantine* (B. S. G. F., 2^e, t. 9, p. 342). — 1855. FOURNET. *Sur les gîtes d'oxyde d'antimoine du pays des Haractas en Algérie* (B. S. G. F., 2^e, t. 12, p. 1039). — 1904. LACHOIX. *Minéralogie de la France* (t. 3, p. 16). — 1910. DUSSERT, *loc. cit.*, p. 143 et pl. IV, fig. 2.

³ On retrouve ailleurs, dans l'Afrique du Nord, des cas analogues d'altérations superficielles ayant donné des apparences de couches : par exemple, pour les carbonates de plomb nouvellement découverts près des oxydes de fer de Tabarca en Tunisie.

Le minerai forme des amas irréguliers, bien parallèles aux couches, dans les terrains, en ce point-là verticaux et de direction N. 150° E., surtout au contact des calcaires et des marnes. Fréquemment, du calcaire est empâté dans le minerai : ce que Coquand attribuait à une précipitation simultanée, analogue à celle des minerais de fer jurassiques, et ce qui paraît beaucoup plutôt déterminé par le remaniement et les substitutions.

Coquand considérait également comme difficilement explicable la formation ultérieure de cristaux octaédriques de sénarmontite, au centre de calcaires compacts; mais, quelles que puissent être les difficultés d'interprétation dans le détail, il faut remarquer combien ces calcaires verticaux, dans lesquels s'est incrusté d'abord le mélange complexe de sulfure d'antimoine, mercure et zinc, ont dû favoriser les actions métamorphisantes.

Industriellement, ce gîte, repris et abandonné à diverses reprises, fournissait jadis au commerce quatre variétés de minerai d'antimoine oxydé : 1° compact; 2° grenu; 3° cristallisé; 4° disséminé. Le minerai compact, d'un blanc laiteux et d'aspect pierreux, ressemble à la céruse du commerce. Le minerai grenu contient des géodes de cristaux octaédriques, ayant parfois plus de 3 cm. de diamètre. Le minerai disséminé forme des cristaux libres au milieu des argiles.

En dehors de l'oxyde, il existe du sulfure d'antimoine, peu répandu, en petites houppes soyeuses, parfois converties partiellement en oxyde sulfuré, et alors d'un brun rouge. Dans certains échantillons décrits par A. Lacroix, de gros octaèdres de sénarmontite, pouvant être agglomérés en blocs de plusieurs kilos, sont colorés en noir par de très fines aiguilles capillaires de stibine. Ailleurs, la sénarmontite, en octaèdres transparents, tapisse les cavités de masses de stibine cotonneuse et est accompagnée d'aiguilles de kermès (oxy-sulfure), qui la colore parfois en rouge.

A 4 km. Ouest d'Hamimat, près d'*Aïn-Bebbouch* et sur le versant Ouest de la même montagne, à *Sensa* ou *Sanza*, un autre gîte d'antimoine oxydé est formé, presque exclusivement, non plus de sénarmontite, mais d'un autre oxyde d'antimoine plus rare, la valentinite. Cette valentinite s'est développée dans des conditions analogues, par épigénie de stibine. Parfois l'extrémité des fibres de valentinite est d'un beau jaune vif, s'étant elle-même transformée en cumengite (hydrate d'oxyde d'antimoine). Le Musée possède également, de *Sensa*, de grandes baguettes d'oxyde hydraté, provenant de la transformation de cristaux cannelés de stibine, eux-mêmes entourés par une gaine de cinabre¹.

Anatolie. — Nous avons signalé en Anatolie le rapprochement possible du cinabre et de l'antimoine².

Perse. — La stibine est fréquente dans le district d'Afshar, en filons encaissés dans le calcaire. On retrouve là le groupement de galène, cuivre gris, cinabre, réalgar et stibine, dont nous venons de voir la géné-

¹ LACROIX. *Minéralogie de la France*, t. 2, p. 457; t. 3, p. 22.

² Tome 4, page 758 et 759.

ralité le long des plissements tertiaires. L'emploi très ancien de l'antimoine comme fard dans les pays orientaux a attiré l'attention sur les points où l'on rencontre cette substance, dite « Surmeh »; d'où d'assez nombreux Kouh-i-Surmeh.

Bornéo, Californie, etc. — Le groupe cinabre et stibine se retrouve : à Tegora, district de Sarawak, dans l'île de *Bornéo*; à Stayton, comté de San Benito, en *Californie*; en beaucoup de points du *Mexique* (Huitzuc, etc.). A Ancachs, au *Pérou*, on a cinabre avec cuivre gris, galène et blende.

6° ASSOCIATION ANTIMOINE, ARSENIC ET SOUFRE

Il est assez rare de trouver l'arsenic et l'antimoine associés sans autres métaux¹. Nous avons cependant signalé déjà quelques gisements de ce genre quand il a été question de l'arsenic : en Transylvanie, en Macédoine (Allchar), en Nouvelle-Calédonie (Nakéty), etc.

Allchar (Macédoine)². — On peut, d'après Beck et Hofmann, signaler à ce propos le gisement d'Allchar, près Rozsdan, en Macédoine (au N.-W. de Salonique), où une zone irrégulièrement métallisée en sulfure d'antimoine et d'arsenic s'étend sur 4 km. de long dans un calcaire dolomitisé sous un toit de micascistes. Au Sud, on a de la stibine avec ses minerais d'altération; au Nord, du réalgar et de l'or piment, renfermant encore des noyaux de mispickel dont ils semblent dériver.

7° FILONS ANTIMONIQUES FORMANT FILONS-BOUCHES, OU SUBSTITUTIONS AU CONTACT DES CALCAIRES ET DES SCHISTES

Les gisements que nous allons signaler ici sont de simples filons que l'on peut faire rentrer dans l'un ou l'autre des groupes précédents. Il peut néanmoins y avoir intérêt à grouper un certain nombre de cas où l'imprégnation et la substitution ont donné à ces filons une allure spéciale. Cette imprégnation met en évidence la pénétration d'antimoine en dissolutions hydrothermales, telles que nous les retrouverons plus tard pour le mercure.

Imprégnations dans les grès. — Nous avons, par exemple, déjà signalé des imprégnations dans le dinantien à *Villerange* dans la Creuse, à *Arnsberg* en Westphalie, etc.

On a, aux États-Unis, quelques bons types d'imprégnation gréseuse appartenant à la série tertiaire.

L'Antimony King Min Cr., dans le *Nevada*, près Austin et Battle Mountain, exploite des fissures de contact entre le schiste au mur et le grès calcaire ou le porphyre au toit. Le minerai occupe des lentilles de

¹ Voir, à ce propos, ce qui a été dit plus haut, t. 1, p. 733 et 736 sur le réalgar.

² 1890. V. FOULLON. *Ueber Antimonit und Schwefel von Allchar* (Verh. KK. R. Wien, p. 318-322). — 1891. A. HOFMANN. *Antimon und Arsen Erzbergbau Allchar in Mazedonien* (Oest. Z. f. B. u. H., t. 39, p. 167-173). — Beck. *Loc. cit.*, t. 2, p. 305.

10 à 50 m. de long, dont la largeur atteint 20 m. à Austin et seulement 2 à 3 à Battle Mountain.

Dans l'*Utah*, à *Coyote Creek*, la stibine est disséminée à la base d'un grès éocène tendre et grisâtre formant une couche presque horizontale au-dessus d'un conglomérat. On la trouve au contact du conglomérat sur 1,30 m. d'épaisseur en masses lenticulaires ayant 7 à 8 m. de diamètre et 0,60 m. d'épaisseur, au centre, ou encore en filets réguliers de 0,10 m. d'épaisseur. Le minerai tient, en moyenne, de 10 à 20 p. 100 d'antimoine et doit subir une concentration. Il est exempt de plomb.

Substitutions aux calcaires (Kostainik, etc.). — Il existe, d'autre part, une série de gisements antimonieux qui doivent à leur introduction dans des calcaires une allure très spéciale. Nous en avons déjà cité quelques-uns : à *Charmes* (Ardèche), où une dolomite triasique a été pénétrée de silice et de stibine; puis en Toscane, à *Cettine di Cotorniano* et *Pereta*; en Algérie (*Dj. Taya*, *Dj. Hamimat*, etc.). On peut rapprocher de ces derniers cas, qui sont caractérisés par l'association au mercure, un exemple intéressant dont nous avons réservé la description pour ce paragraphe : celui de *Kostainik*, où le quartz à stibine, sans autres minerais, forme des gisements très développés dans les calcaires, en association avec des trachytes.

Les gisements tertiaires de *Kostainik*, en Serbie¹, occupent une zone N.-W.-S.-E. de 16 km. sur 1,5 km. dans le bassin de la Styra et de la Bornia, affluents de la Drina.

L'antimoine, en relation étroite avec des trachytes à biotite et hornblende, forme là toute une série de gisements aux allures diverses, en particulier des filons-couches, entre des calcaires probablement triasiques et des schistes argileux, ou grauwackes, qui les recouvrent en concordance. Ces gisements sont généralement formés de stibine; quartz et calcite, avec quelques produits secondaires comme la valentinite, la sénarmontite et le soufre.

Dans le détail, les types sont très variables. Ainsi, l'on a : à Kik et Stolitza, des veines dans le trachyte altéré; à Roviné, un système filonien dans le schiste, formé de deux veines principales avec des veinules transversales disposées comme les barreaux d'une échelle; puis, dans la plupart des petites mines, Zavorié, Styra, Dolovié, etc., des gites de contact, entre le calcaire et le schiste, avec pénétration connexe de dykes trachytiques. Ces derniers gisements sont formés d'un quartz à grain très fin, rendu sombre par des poussières microscopiques d'hydrocarbures et semé de petits agrégats de stibine, qui parfois ont été transformés en oxyde, ou même complètement dissous en laissant des trous. La métallisation est quelquefois parallèle au contact, dont elle reproduit les plissements, mais parfois aussi tout à fait irrégulière. Il paraît donc y avoir eu ici substitution du quartz antimonieux au calcaire, avec localisation des eaux métallisantes dans les conditions habituelles, sous un toit de schistes imperméables, dans un calcaire fissuré.

¹ 1900. R. BECK et W. VON FRICKS. *Die Antimonlagerstätten von Kostainik in Serbien* (Z. f. pr. G., p. 33-36; résumé, avec fig. dans BECK, t. 2, p. 302 à 304).

CHAPITRE XXIII

BISMUTH

Bi = 208,0

I. — USAGES ET STATISTIQUE

Usages. — Confondu pendant longtemps avec le plomb et l'étain, le bismuth était connu des alchimistes du xv^e siècle. D'après Hellot (1737), les fondeurs d'étain du Cornwall se servaient du véritable bismuth pour rendre leur étain brillant, dur et sonore. On connaissait également, avant le xviii^e siècle, l'emploi pharmaceutique du sous-nitrate.

Aujourd'hui, le bismuth a quelques usages industriels, limités par son prix élevé, en particulier à l'état d'alliage. Ses combinaisons avec d'autres métaux sont remarquables par leur fusibilité. L'alliage fusible le plus anciennement connu est celui de Newton (8 de bismuth, 5 de plomb, 3 d'étain); il fond à 94°,5. L'alliage fusible proprement dit, ou alliage de Darcet, est formé de 2 parties de bismuth, 1 de plomb et 1 d'étain. On se sert de ces alliages pour cliquer des médailles; on en a fait aussi des rondelles fusibles pour les soupapes de sûreté des machines à vapeur. Le bismuth sert également pour la construction des piles thermo-électriques.

Enfin on utilise quelques-uns de ses sels: surtout le sous-nitrate de bismuth, en médecine. Le chlorure de bismuth forme le blanc de fard, appelé blanc de perle et entre dans la confection de la cire à cacheter. L'oxyde a un petit emploi dans les couleurs sur porcelaine.

Statistique. — Pendant longtemps, la Saxe a eu le monopole de la production du bismuth (50 t. en 1877; 68 en 1881). Aussi le prix du métal a-t-il été, à diverses époques, soumis à des fluctuations considérables; après avoir valu 11 fr. le kg., il s'éleva, en 1869, jusqu'à 55 fr. le kg. et, pendant la guerre de 1870, il fut presque introuvable, même pour les usages médicaux. Depuis, le prix a baissé par suite de la mise en valeur des mines de Bolivie. Actuellement, le principal producteur est la Bolivie, qui exporte, suivant les années, 200 à 600 t. de bismuth (180 t. en 1909; 200 en 1910); secondairement, la Saxe; puis l'Australie (Queensland et New South Wales); le Mexique, etc.

En 1910, le Queensland a fourni 22 t. et le New South Wales, 7 t. Au Mexique, l'exploitation principale est celle de la Bismuth King Mine, dans le district de Cosala (Sinaloa).

Une certaine quantité de bismuth est, en outre, obtenue comme sous-

produit dans diverses industries. Ainsi, en 1907, les États-Unis ont produit 4,5 t. de bismuth : en partie dans les fabriques d'acétates de plomb de la National Lead Co, où l'on obtient un résidu à 8 p. 100 de bismuth ; en partie dans le raffinage électrolytique du plomb. Quelques minerais mexicains sont traités aux Monsanto Chemical Works de Saint-Louis. Les États-Unis importent, de plus, environ 100 à 125 t. de bismuth par an.

Le commerce de ce métal est assez difficile par suite de sa consommation restreinte. Il appartient à un syndicat de raffineurs, formé par la Johnson Matthey and Co de Londres, les fondeurs royaux de Freiberg et Oberschlema en Saxe, la Deutsche Gold and Silberscheideanstalt de Frankfurt. Ce syndicat, après avoir maintenu un prix de 25 fr. le kgr. en 1905, l'a réduit brusquement à 14 pour tuer la concurrence, puis remonté à environ 18 fr. de 1907 à 1910¹.

Les minerais tenant moins de 10 p. 100 de métal trouvent malaisément acheteur à moins de conditions spéciales et la moyenne des minerais marchands est de 20 à 25, allant jusqu'à 50 p. 100. Si on prend pour unité le minerai à 10 p. 100, la valeur d'un minerai à 15 p. 100 sera 1,7 ; à 20 p. 100, 2,3 ; à 30 p. 100, plus de 3,7 ; à 40 p. 100, plus de 5 ; à 50 p. 100 ; plus de 6,7. Naturellement la proportion et la nature des autres corps associés au bismuth influent sur le prix.

II. — MINERAIS. ROLE GÉOLOGIQUE ET CLASSIFICATION

Minerais. — Le *bismuth* se présente souvent à l'état natif. Il est alors rarement pur ; le plus souvent, il contient une certaine proportion d'arsenic. On l'a, en outre, observé allié à du tellure, du sélénium et du soufre. Il forme généralement, non pas des cristaux nets, mais des ramifications palmées, que les anciens minéralogistes appelaient *tricotis*.

Le bismuth sulfuré, ou *bismuthine* (Bi^2S^3), est d'un gris de plomb. Il forme des baguettes analogues à celles de la stibine, mais fusibles à la bougie. Il tient 81,2 p. 100 de bismuth.

En outre, il existe des bismuthines cuprifères (*wittichénite*, *emlectite*), une autre plombifère (*cosalite*) ; des bismuths sulfurés plombo-cuprifères (*nadelerz*, *aikinite*, ou *patrinite*, *chiviatite*) ; un bismuth argentifère (*chilenite*) ; puis des combinaisons avec le soufre, le sélénium et le tellure, telles que la *bornine* ou *tetradymite*, à 35 p. 100 de tellure et 3 à 5 de soufre et de sélénium ; la *guanajuatite* ou *frenzelite* ($2\text{Bi}^2\text{Se}^3\text{Bi}^2\text{S}^3$), la *silvanite* (Bi^2Se), et la *grunlingite* ($\text{Bi}^2\text{S}^3\text{Te}$). Le bismuth et le tellure peuvent, du reste, s'unir en proportions variables pour donner de véritables alliages.

Enfin, les affleurements des gisements de bismuth présentent quelques produits oxydés : la *bismuthocre* (Bi^2O^3) à 89,6 p. 100 de Bismuth ; la *bismuthite* ($\text{H}^8\text{Bi}^8\text{C}^3\text{O}^{22}$) et l'*eulytine* (silicate) à 83,8 p. 100.

Rôle géologique. — Chimiquement, le bismuth a pu être considéré comme un métalloïde trivalent² à rapprocher de l'antimoine ($\text{Bi}^2\text{O}^3, \text{Sb}^{23}\text{O}$).

¹ En 1911, le prix au détail est de 25 fr. le kg.

² Voir plus haut, tome 1, p. 45.

Géologiquement, il n'est pas, en effet, sans quelques analogies avec l'antimoine, bien qu'il ne se rencontre pas associé avec lui dans ses gisements. On peut notamment remarquer que sa forme profonde paraît être un sulfure : les oxydes et carbonates étant très certainement des produits d'altération et le bismuth natif, quoique fréquent, ayant bien des chances pour résulter aussi d'une réaction de ce genre. Mais, si l'on envisage les gisements du bismuth, c'est dans un autre groupe qu'on est amené à le placer, avec les métaux associés aux roches acides et riches en alcalis, comme un intermédiaire entre la série sulfurée du molybdène, du cuivre, du cobalt, et la série de l'étain, du tungstène, de l'uranium, qui se développe dans les mêmes roches, avec des formes de profondeur oxydées. Lorsque le bismuth abonde avec l'étain comme en Bolivie, c'est avec l'étain associé au cuivre sulfuré ; et, d'autre part, le bismuth entre dans les filons cobalto-argentifères, qui sont également sulfurés. La combinaison fréquente du bismuth avec le tellure et le sélénium est un caractère qui rapproche le bismuth de l'or et du cuivre.

D'une façon presque constante, le bismuth apparaît dans une gangue quartzeuse : ce qui correspond bien avec le type métallogénique que nous venons de lui attribuer. Son développement, à l'état natif, établit une comparaison avec l'or, le cuivre, l'argent et l'arsenic, en le distinguant de l'antimoine.

On peut diviser les gisements de bismuth en trois groupes principaux, dont la plupart ont déjà été décrits à l'occasion d'autres métaux et qui tous le montrent associé à des métaux de départ acide :

- 1° Association du bismuth avec l'étain et le cuivre, accessoirement avec le tungstène et le molybdène ;
- 2° Association du bismuth avec le cobalt et l'uranium ;
- 3° Association du bismuth avec l'or.

1° ASSOCIATION DU BISMUTH AVEC L'ÉTAÏN

Amérique du Sud¹. — Le type de ce genre de gisements se trouve en Bolivie, où nous l'étudierons plus particulièrement au chapitre de l'étain². Nous verrons alors qu'il y a là, en relation probable avec des liparites et des dacites, un certain nombre de filons cupro-stannifères avec bismuth, wolfram, parfois tourmaline et fluorine.

Ces gisements boliviens sont situés presque au sommet des Andes. Au *Cerro de Chorolque* (5 624 m.), une brèche stannifère à gangue quartzeuse suit le contact des rhyolites avec des schistes silicifiés. Elle renferme, avec de la cassitérite abondante, un peu de galène, de la bismutine, du bismuth, du mispickel, de la barytine, de la sidérose et de la tourmaline exceptionnelle.

¹ Coll. Ecole des Mines, nos 1804 et 1943. — 1884. V. FOULLON. *Ueber Zinnerze und gediegenen Wismuth* (Verh. KK. geol. Rlt, t. 34, p. 144. Vienne). — 1876. DOMEYKO. *Gisements de bismuth au Chili* (Ann. d. M., p. 7, 10, 15). — 1877. *Sur les minéraux du bismuth de Bolivie, Pérou et Chili* (C. R.). — 1894. *Mines de bismuth et d'antimoine en Bolivie* (Bull. Ann. d. M., 9^e, t. 5, p. 667).

² Tome 2, pages 69 à 74.

Les filons de bismuth de *Tazna* (à 40 km. S.-E. de Chorolque), bordent des filons de dacite dans les schistes argileux. On y trouve, dans une gangue de quartz avec sulfures de cuivre et de fer, de la bismuthine, du bismuth natif, un peu d'or natif et de la sidérose.

Ce sont surtout ces deux mines qui envoient en Europe une grande quantité de minerai. Celui-ci consiste en un mélange de plusieurs espèces, entre autres de sulfures de cuivre et de fer, contenues dans une gangue quartzreuse ; cette gangue mise à part, ces minerais tiennent : 22 à 30 de bismuth, 10 à 17 de fer, 9 à 12 de soufre et des traces d'antimoine, argent, plomb.

La présence du cuivre et du fer, au lieu du plomb et de l'argent comme en Saxe, rend ces minerais américains de qualité supérieure, parce que la séparation de ces métaux est plus facile.

D'autres gisements de bismuth, que nous signalons à ce propos sans pouvoir préciser leur type métallogénique, ont été mentionnés dans l'Amérique du Sud.

Au *Chili*, l'on cite les mines de *San Antonio del Potrero Grande*, où l'on a trouvé du bismuth natif, de la chilénite (bismuth argentifère), etc. et des minerais d'autres métaux tenant un peu de bismuth.

Au *Pérou*, la mine *Mathilde*, près de Morococa, contient du bismuth. C'est de là que provient l'espèce minérale décrite par Rammelsberg sous le nom de Mathildite.

Dans la *République Argentine*¹ près de la Tome, on a signalé, dans le gneiss, un filon de quartz avec mica alcalin renfermant un carbonate de bismuth avec de la columbite et du cérium.

Au *Mexique*, on a trouvé également des minerais de bismuth, entre autres la frenzélite et la silaonite, dans les mines de *Guanajuato*.

Australie². — Le bismuth existe en divers points du Queensland, du New South Wales et de la Tasmanie, qui contiennent, en même temps, les gisements d'étain et de tungstène.

Dans le *New South Wales*, on exploite le bismuth, tantôt dans les alluvions stannifères (New England) ; tantôt en filons, comme à Silent-Grove, The Gulf, Glen-Innes, Elsmore, Tenterfield et Adelong. Les minerais consistent en bismuth natif et en autres composés de ce métal, qui accompagnent le molybdène et l'or, comme à Tenterfield, dans le comté de Clive (minerais à 60 p. 100 de bismuth), ou le cuivre comme à Cobar, dans le comté de Robinson (minerais de 2,11 à 2,58 p. 100 de bismuth). La production du New South Wales, en 1910, a été de 7 t.

En *Tasmanie*, dans la région stannifère du mont Ramsay, il existe de grands et riches filons de 6 à 12 m. de puissance, contenant du bismuth associé au wolfram.

¹ 1899. BODENBENDER. (Z. f. pr. G., p. 322).

² 1875. WINTLE. *Stannif. dep. of Tasmania*, p. 92. — 1877. *Ueber das Vorkommen von Wismuth und Zinnstein auf Tasmania* (Bonn naturhist. Ver., 4^e série, t. 7, p. 63). — 1881. *Bismuth du Queensland* (Mining Journ., 1442). — 1882. HARRIE WOOD. *Miner. prod. of New South Wales*, p. 32. — 1882. LIVERSIDGE. *Miner. N. S. Wales*. — 1893. (Z. f. pr. G., p. 240). — Voir, à l'étain, t. 2, p. 63.

Iles Britanniques. — Sans parler des gîtes insignifiants disséminés çà et là dans le Devonshire et le Cumberland, on peut citer les deux mines de *East Pool* et *Illogan*¹, en Cornwall, qui sont, l'une une mine d'étain, l'autre de cuivre, et qui ont donné, en 1878, environ 400 kg. de bismuth. La production anglaise du bismuth est insignifiante; elle a rarement dépassé une tonne et est tombé à rien dans ces dernières années.

Meymac (Corrèze)². — On peut ranger dans le même groupe le petit gisement de Meymac (Corrèze), où le système des associations stannifères est surtout représenté par le wolfram.

Le gîte de Meymac, signalé en 1867 par Adolphe Carnot et quelque temps exploité, est situé au Sud d'une grande chaîne granitique dans un granite porphyroïde, à mica noir et à grands cristaux de feldspath, parsemé de muscovite et renfermant de tous côtés des nids de tourmaline radiée, que traversent de nombreux pointements de granulite saccharoïde et de pegmatite.

Dans ce granite, court un filon quartzeux de puissance variable, quelquefois de plusieurs mètres, qui contenait, aux affleurements, du wolfram, du mispickel, quelques minéraux arseniatés et phosphatés, mais qui, à 20 m. de profondeur, dans une zone moins altérée, s'est transformé en une masse de pyrite de fer légèrement cuivreuse et bismuthifère avec de la schéelite, son produit d'altération, de la meymacite (tungstate hydraté de chaux et de fer), un peu de cassitérite et du mispickel faiblement cobaltifère.

Les minerais du bismuth sont : le bismuth natif, le bismuth sulfuré et, par altération, la bismuthocre et l'hydrocarbonate, ou bismuthite, qui a été surtout exploité.

Quelques minéraux de plomb, le carbonate, le sulfate, le chlorophosphate et le molybdate se sont également rencontrés, ainsi que de la molybdénite. Dans les parties hautes, les minerais de bismuth tiennent un peu d'arsenic, d'antimoine, de plomb, de cuivre, de fer, etc., et, par contre, les minerais des autres métaux contiennent tous du bismuth; le mispickel, entre autres, renferme de 1,62 à 6,58 p. 100 de bismuth.

Au voisinage immédiat de ce filon on a trouvé encore des veines d'une granulite à grain fin renfermant divers minéraux, entre autres du sulfure de bismuth, avec des pyrites de fer et du cuivre, de la blende, etc.

L'exploitation, arrêtée en 1883, a produit quelques centaines de kg de bismuth. En 1891, un autre essai a été fait pour exploiter l'étain et a permis de suivre deux veines de quartz stannifère. L'une est large d'environ 0,20 à 0,25, à cassitérite très finement disséminée, avec les autres sulfures précédemment signalés, et un peu de stannine. L'autre est formée d'une roche feldspathique à joints tapissés de fluorine, qui se charge

¹ Voir tome 2, pages 6, 23, 24, 31 et 93.

² Coll. Ecole des Mines, 1959. — Feuille de Mauriac. — 1874. CARNOT. *Découverte d'un gisement de bism. en France* (Ann. Ch. Phys., 1874 et C. R., 19 janvier 1874; Ann. d. M., 1878), — 1896. LACROIX. *Minéralogie de la France*, article Bismuth. — 1897. BURTHE. *Sur les travaux de recherche exécutés à Meymac* (Ann. d. M., 9^e. t. 82, p. 5 à 31 avec 3 pl.).

par places de mica brun, de quartz en grains ou filets, de pyrites de fer et de cuivre, de blende et de cassitérite très fine.

On a trouvé également un peu de bismuth natif dans le gisement du wolfram de *Puy-les-Vignes* et Daubrée en avait signalé des parcelles dans une géode de calcite du gîte de fer de *Framont* (Vosges)¹.

2° ASSOCIATION DU BISMUTH ET DU COBALT A GANGUE QUARTZEUSE

Nous aurons à revenir sur des gisements de ce genre à propos du cobalt². Le type en est à *Schneeberg*, en Saxe, qui sera étudié à l'occasion de l'argent, ou dans les gisements voisins de *Joachimsthal* réservés pour le chapitre de l'uranium³.

On trouve, à *Schneeberg*, comme nous le verrons dans les schistes superposés au granite et métamorphisés par lui, 100 à 150 filons de cobalt et argent à gangue quartzeuse avec bismuth natif (et, superficiellement, bismuthocro), pechblende, accessoirement blende, galène, chalcopyrite. Ces filons minces, en *stockwerks*, très riches à la surface et dans lesquels des effets de remises en mouvement anciennes paraissent bien prouvés, sont tous devenus inexploitable, quand, vers 460 m. de profondeur, on a pénétré des schistes dans le granite sous-jacent. L'émanation métallifère, partie de ce granite, n'avait dû cristalliser qu'à sa périphérie.

A *Wittichen*, dans la Forêt-Noire, le bismuth se rencontre dans un filon d'argent et de cobalt qui traverse le granite.

Plus au Nord, près de *Schutzbach*, dans le pays de Siegen, on trouve le bismuth associé à des sulfures de nickel, fer et cuivre dans des roches dévoniennes.

Ailleurs, les rapprochements entre le bismuth et le cobalt sont fréquents (*Tunberg*⁴, *Sainte-Marie-aux-Mines*, etc.).

La cobaltine aurifère, signalée par exemple au *Transvaal*, peut, d'ailleurs, être rapprochée des séléniures ou tellures de bismuth avec or, que nous allons décrire, ainsi que des stibines aurifères, déjà étudiées.

3° ASSOCIATION DU BISMUTH ET DE L'OR

L'association, relativement fréquente, du bismuth avec l'or met en relief les rapports qui existent entre ce corps et le groupe du soufre, de l'arsenic, de l'antimoine, etc. Elle est en faveur de la place que nous avons attribuée au bismuth dans notre série⁵.

Transylvanie. — A *Rezbanaya*, en Transylvanie, des tellures d'or et d'argent sont associés à des tellures de bismuth.

¹ 1850. DAUBRÉE. *Sur la présence du bismuth natif dans le minerai de fer de Framont* (Vosges). (B. S. G. F., 2^e, t. 7, p. 352). — 1874. *Métallurgie du bismuth* (Ann. Ch. et Phys., t. 5, p. 1, 397).

² Tome 2, pages 614 à 616.

³ Tome 2, pages 80 à 83.

⁴ Tome 2, page 614.

⁵ Voir tome 1, p. 45.

Bléka¹. — Un gisement intéressant, mais sans valeur industrielle, est situé à *Bléka* (ou *Svartdal*)¹, au Nord-Est de Mogen, dans le Sud de la Norvège. En ce point, il existe des schistes anciens, fortement et inégalement imprégnés de pyrite, que recoupe des filons contenant un peu de bismuth sulfuré et d'or natif, avec du quartz, des pyrites de cuivre et de fer et de la galène accessoire. On a cru remarquer, par un phénomène analogue à celui que nous signalerons à Kongsberg, que deux colonnes d'enrichissement en or, constatées dans les filons, correspondaient à l'abondance de la pyrite dans les schistes recoupés.

États-Unis. — On rencontre aux États-Unis le bismuth associé à l'or et au tellure.

C'est surtout dans les États orientaux qu'on connaît le bismuth. Il existe à l'état de minerai telluré (tétradymite, etc...) dans les mines de Virginie (*Monroe*, *Tellurium*, etc...), de Géorgie et de la Caroline septentrionale; à l'état de bismuth natif et de bismuth sulfuré dans le district de *Cesterfield* dans la Caroline méridionale. Dans d'autres mines, il est uni au tungstène, comme dans la mine de *Lane*, au Connecticut.

Les mines des États occidentaux ont fourni plusieurs espèces minérales nouvelles de bismuth (scirmérite; alaskaïte, ou sulfure de Bi, Pb, Ag, Co, etc...); elles sont situées au Colorado, dans l'Utah et le Montana.

Au *Colorado*, on trouve les mines de bismuth à l'état de filons puissants, habituellement dans le porphyre, quelquefois dans le calcaire silurien, comme près d'Ouray, ou dans d'autres roches.

Queensland et New South Wales. — Les gisements australiens, en même temps qu'ils associent, comme nous l'avons vu, l'étain au bismuth, en rapprochent également l'or. On a trouvé, à Cloncurry, du bismuth renfermant des mouches d'or. L'or et le molybdène accompagnent le bismuth à Tenterfield, dans le New South Wales, etc.

4° ALLUVIONS A BISMUTH

Les minerais de bismuth sont dans le cas ordinaire de la plupart des minerais métalliques, qui, à l'exception d'éléments durs ou lourds comme la cassitérite, la magnétite, l'or et le platine, ont rarement échappé à la destruction rapide dans le phénomène alluvionnaire. Cependant on peut citer, à titre de curiosités, quelques cas de ce genre, dont un seul, au Nord du *Queensland*, à *Bamford*, dans le district de Thornborough, a donné lieu à une courte exploitation. On y trouvait des fragments arrondis de bismuthine et du bismuth natif à enduit carbonaté avec du wolfram et du quartz, le tout provenant de la destruction d'un stockwerk voisin. Le même fait a été constaté en plus petit sur le fleuve Percy (district de Cloncurry) et l'on a également signalé la présence du bismuth natif dans les alluvions stannifères de Bolivie³.

¹ Coll. Ecole des Mines, 1958. — Description par Vogt. *Norske Erstforekomster*.

² Voir plus haut, tome 1, page 779.

³ Beck. *Loc. cit.*, t. 2, p. 450.

CHAPITRE XXIV

MOLYBDÈNE

Mo = 96,0

I. — USAGES ET STATISTIQUE

Usages. — Le molybdène, comme beaucoup d'autres petits métaux, a pris de l'importance pratique le jour où l'on a commencé à l'employer en sidérurgie pour la fabrication des aciers spéciaux.

Les aciers au molybdène sont divisés par la micrographie en deux grandes classes : l'une à 0,20 p. 100 de carbone, l'autre à 0,80 : la teneur en molybdène variant, dans les deux cas, de 0 à 15 p. 100¹.

L'addition de molybdène accroît, dans de fortes proportions, la ductilité, la résistance à la rupture et l'élasticité. Une simple addition de 0,25 p. 100 de molybdène augmente de 40 p. 100 l'allongement à la rupture. On utilise, en concurrence avec les aciers au tungstène moins coûteux, des aciers au molybdène comme aciers à outils, aciers rapides à 0,5—2 p. 100 de molybdène, ou aciers à aimants permanents à 3,70 de molybdène et 1,20 de carbone. Avec des alliages ternaires ou quaternaires, tels que l'acier nickel-molybdène, chrome-molybdène ou nickel-chrome-molybdène, on obtient des aciers de grande résistance, des tôles de chaudière à haute pression, des matériaux de construction, des blindages ou projectiles. En moyenne, le molybdène donne des résultats analogues à ceux du tungstène sous un poids quatre fois moindre ; mais sa rareté et, par suite, son prix élevé, paralysent le développement de cette industrie.

La préparation de la fonte de molybdène est facile à réaliser par suite de l'affinité du molybdène pour le carbone. Les ferro-molybdènes industriels sont des alliages ternaires de fer, carbone et molybdène : l'élimination complète du carbone ne pouvant encore se faire industriellement. On les obtient, soit par union directe des éléments à une température suffisamment élevée, soit par l'action de l'aluminium avec un mélange d'oxydes de fer et de molybdène (alumino-thermie), soit surtout par la réduction électro-thermique du bioxyde de molybdène en présence du fer. Ces ferro-molybdènes remplacent aujourd'hui, dans la plupart des usages, la fonte de molybdène toujours impure, ou le molybdène métallique. Quelquefois, comme nous venons de le dire, on fait un alliage quaternaire avec un autre métal, comme le nickel et le chrome.

¹ 1909. ESCARD. *Les métaux spéciaux*, Dunod.

Accessoirement, le molybdène a quelques autres petites applications.

Dans les fabriques de poteries, on obtient, au moyen du molybdène, des tons bleus très brillants et très solides. Pour cela, on verse, dans une dissolution de molybdate de sodium, du chlorure d'étain, qui produit un précipité bleu. Cette matière colorante peut être fixée, quoique avec quelques difficultés, sur la laine et sur la soie. D'autre part, on emploie aussi, pour teindre la soie en bleu, une solution d'acide molybdique dans l'acide sulfurique. Le « bleu de molybdène » est un molybdate de molybdène.

En Suède, le molybdate de sodium a été essayé pour le traitement de l'hydropisie.

Enfin le molybdate d'ammonium est employé en chimie pour précipiter l'acide phosphorique, en liqueur acide, en présence de toutes les bases et acides minéraux.

Statistique et prix¹. — Il n'existe aucune statistique pour ce corps, qui n'a pas non plus de marché à des cours déterminés. Mais la production mondiale ne doit pas dépasser 150 à 200 t.

On le vend généralement à l'état de concentrés à 90—95 p. 100 de molybdénite, qui peuvent valoir 2 250 fr. la tonne (2 à 3 000 fr. de 1908 à 1911). L'alliage à 80 p. 100 de molybdène et 2 à 4 p. 100 de carbone peut être obtenu à raison de 5 500 fr. la tonne et se vend 8 à 10 000 fr. (10 à 12 fr. 50 le kg. teneur). Mais le marché est extrêmement irrégulier. On cite, parmi les principaux consommateurs européens, Krupp, le Creusot, etc.

Au détail, le molybdène industriel à 95 p. 100 vaut 30 fr. le kg. (1911); le molybdate d'ammonium 18 fr. le kg; le molybdate de chrome ou de fer, 40 fr.

En *Australie*, la production est relativement importante et évaluée à 70 t. de molybdénite, en 1906. En 1910, le Queensland a produit 107 t. valant 300 000 fr., le New South Wales, 49 t. valant 140 000 fr. La *Norvège* peut produire 40 à 50 t.

En 1908, les *Etats-Unis*, par suite de la crise métallurgique, n'ont produit que 15 t. de molybdénite, pour la plus grande partie dans l'Oregon, un peu aussi dans le Maine, près Machias.

Il vient également un peu de molybdénite de *Suède* (Ekholmen dans l'archipel de Westerwick).

II. — MINÉRAIS, ROLE GÉOLOGIQUE ET CLASSIFICATION

Minerais. — Le molybdène a deux minerais pratiques : la *molybdénite* MoS_2 (ou sulfure de molybdène) et la *wulfénite*, ou plomb jaune (molybdate de plomb), dont les conditions de gisement sont, nous allons le voir, très différentes. Il existe, en outre, un certain nombre de minéraux secondaires, comme la *molybdine* (ou molybdénocène) MoO_3 , l'*ilsemannite* (molybdate d'oxyde de molybdène), un molybdate d'uranium, la *molybdurane* et des combinaisons complexes comme l'*éosite* (molybdo-

¹ Voir *Mineral Industry* for 1909, t. 18.

vanadate de plomb), l'*achrématite* (molybdo-arséniate de plomb chloruré), la *powellite* (molybdo-tungstate de calcium), la *pateraïte* (molybdate impur de cobalt), etc.

Gisements et rôle géologique. — Le molybdène a deux catégories de gisements bien distinctes. Le premier type, le plus important, auquel se rattachent la molybdénite, la molybdurane, la powellite, et même la pateraïte, fait rentrer le molybdène dans le groupe de l'étain, du tungstène et de l'uranium en association avec les granulites, pegmatites, etc. En étudiant l'étain, nous aurons l'occasion de signaler un très grand nombre de gisements, où la molybdénite intervient ainsi à titre d'élément accessoire. Ce groupement amène également sa présence dans quelques gisements de cuivre (Mansfeld¹), ou son association avec le cobalt, dont nous verrons les rapports avec de semblables roches acides. Le second groupe de gisements, ce sont les filons de plomb, où le molybdène ne se montre clairement qu'aux affleurements (wulfénite, éosite, achrématite, etc.), parfois en quantités considérables et l'on peut, dès lors, se demander, pour lui comme pour le vanadium ou le phosphore, s'il a été là introduit par le dehors ou simplement très concentré en partant de traces disséminées (sans doute sous la forme de molybdénite intercalée en feuilles minces dans les clivages). Ce qui rend la seconde hypothèse plus vraisemblable, c'est que le plomb renferme souvent assez de molybdène, pour qu'on puisse en faire l'extraction dans le raffinage électrolytique ou le traitement des acétates. Il ne faut pas oublier que l'aspect extérieur de la wulfénite contribue à la rendre très visible, tandis que la molybdénite se confond aisément avec la galène.

D'après ce que nous venons de dire, l'on peut songer, pour le molybdène, à deux places naturelles : l'une à côté du tungstène et des autres métaux du groupe de l'étain, avec lesquels on le trouve si souvent associé ; l'autre, où il occuperait, par rapport au plomb, la place du cadmium par rapport au zinc. Tout en le rapprochant du groupe de l'étain, nous avons tenu à faire ressortir certaines affinités du molybdène avec l'arsenic, telles que l'isomorphisme de la molybdine MoO_3 avec la valentinite. C'est pourquoi nous l'avons, avec le bismuth, intercalé entre les métalloïdes et les métaux acidifiables.

1° GISEMENTS DE MOLYBDÉNITE

La molybdénite est souvent en rapport avec le groupe des granulites, pegmatites, et quartz stannifères², ou, d'autre part, avec les syénites zirconiennes, qui, sous une forme moins acide, mais également riche en alcalis, offrent des conditions métallogéniques analogues. On connaît, en outre, un assez grand nombre de filons contenant de la chalcopryrite avec de la

¹ Les scories des mines de cuivre du Mansfeld renferment, d'après HEINE (J. prakt. Chem., t. 9, p. 204, 1834), des traces appréciables de molybdène.

² Quand la molybdénite est dans une gangue de ce genre, si on fait passer le tout au broyage, la gangue se pulvérise, tandis que la molybdénite, aplatie en raison de sa plasticité, reste sur le tamis et peut en être séparée.

molybdénite dans des conditions analogues à celles où l'étain s'associe de son côté au cuivre. Ces deux groupes sont fréquemment réunis.

A. PEGMATITES ET QUARTZ A MOLYBDÉNITE (avec étain, tungstène ou bismuth).

L'*Australie* est le pays qui produit le plus de molybdène. On l'y trouve surtout dans le Queensland¹ et dans le New South Wales, associé avec le groupe stannifère.

Dans le Nord du Queensland, les mines d'or d'Hodgkinson contiennent des veines de quartz avec molybdénite et wolfram traversant un granite gris à biotite. Il existe, en même temps, un peu de bismuth métallique.

Au Nord du New South Wales, la molybdénite, associée au bismuth, se trouve en particulier aux mines Sach, à Kingsgate, près Glenn Innes, dans des sortes de colonnes quartzieuses (pipes). Ces colonnes, larges de 2 à 6 m., sont tortillées suivant la verticale. On y a trouvé des masses de minerai atteignant 250 kg.

En *Californie*, il existe des filons de pegmatite à molybdénite recoupant le granite au N.-E. de Corona (comté de Riverside).

Dans le *Maine* (Etats-Unis), on a commencé plusieurs exploitations de molybdénite, sur les comtés de Washington et Hancock.

Au *Canada*², il existe diverses associations de pyrite, pyrrhotine et molybdénite (parfois avec cuivre) dans des dykes pegmatiteux traversant des gneiss et cipolins (Lynedoch et Ross dans l'East Ontario; Cardiff et Sheffield dans l'Ontario Central). A la Giant mine, en Colombie Britannique, la molybdénite contient de l'or.

En *France*³, on rencontre, dans la région alpestre, un certain nombre de filonnets de quartz et de granulite à molybdénite (au glacier de la Meije, au col du Géant, etc.). Une association semblable existe dans les pegmatites de Miséri, près Nantes, dans celles de Beaujeu (Rhône), etc.

En *Autriche*, le molybdène sulfuré se trouve dans les quartz stannifères de Zinnwald et de Schlangenwald.

En *Hongrie*, on l'a rencontré parfois en petites masses contenant une certaine proportion d'argent et même d'or, dans une argile filonienne.

En *Nouvelle-Calédonie*, à la Coulée, on a signalé un filon de granulite et quartz à molybdénite⁴.

Nous citerons encore, comme gisements de molybdénite, Macchetto (Quittengo), Biella et Traverselle, en *Italie*; Auerbach, Altenberg et Ehrenfriedersdorf, en *Saxe*; Chessy, en *France*; le Chota Nagpur, aux *Indes*.

Le cas du *Cornwall*, où la molybdénite se trouve à la fois avec l'étain et avec le cuivre, peut nous servir de transition pour passer au cas suivant. La molybdénite y est assez peu abondante.

¹ 1902. Z. f. pr. G., p. 138.

² 1911. WALKER (Canada dep. of mines n° 93, 38 p.). — Cf. note 297. Comité des Houillères.

³ Lacroix. *Min. de la France*, t. 2, p. 463.

⁴ Coll. Ec. d. M. 2498.

B. GISEMENTS DE MOLYBDÉNITE AVEC CHALCOPYRITE ET PYRITE

C'est le type le plus fréquent en *Scandinavie*.

Les principales mines de molybdène de Suède se trouvent dans l'île d'*Ekholmen* (Oak-Island), dans l'archipel de Westerwik, au Sud-Est de la Suède, et à environ 30 km. Nord de Westerwik.

L'île est formée de gneiss à amphibole et de schistes micacés, que recourent 7 filons distincts, ayant de 0,15 à 0,50 m. de large. En un point, 4 de ces veines se réunissent et forment un amas de 1,50 m. de large. Le remplissage est composé de molybdénite et pyrite de cuivre, dans une gangue de quartz et de feldspath, avec oxyde de molybdène aux affleurements. Les gites ont 90 m. de longueur reconnue et ont été explorés sur quelques mètres de profondeur. La molybdénite très pure se trouve parfois en amas pesant jusqu'à 1 600 gr. ; quand elle est plus disséminée, on arrive à la trier assez facilement. Ainsi, dans l'été de 1880, trois hommes ont extrait 600 kg. de molybdénite pure et environ 4 000 kg. de minerai de seconde qualité à 9 p. 100 de molybdène. Il n'existe ni apatite ni wolfram avec la molybdénite.

On connaît également des mines de molybdène dans le *Telemark*, telles que Bandaskild, où l'on trouve la molybdénite avec pyrite et chalcopryrite dans une granulite.

Dans le S.-W. de la *Norvège*, quelques petites mines de molybdène se trouvent au N.-E. du Flekkefjord. A la mine Kvine, on a, du toit au mur, une série complexe présentant : 1° un granite gneissique à hornblende renfermant un peu de molybdénite disséminée ; 2° une roche sombre à gros grains formée surtout de hornblende et biotite, avec lentilles de molybdénite et chalcopryrite pouvant atteindre 1 m. d'épaisseur ; 3° une zone de molybdénite presque compacte ayant jusqu'à 0,1 m. ; 4° un banc de microcline avec un peu de quartz et très peu de minerai, large de 0,3 à 1,5 m. ; 5° un granite gneissique à amphibole comme celui du toit.

Cette zone métallifère a pu être suivie sur 200 m. de long et 15 m. de profondeur. Tout autour, il y a, dans le gneiss-granite, des feuilles minces de molybdénite suivant des fissures.

Les conditions sont analogues dans une autre mine (Alt Knaben), située 2 km. plus au Sud. Ici le minerai est surtout dans les salbandes d'un banc de quartz dans un granite gneissique avec micaschistes.

En 1906, Saladin a visité des gisements du même genre dans les *Lofoten*¹ : à Watterfjord pollen près Svolvär et Ostvaago. La molybdénite s'y trouve avec chalcopryrite.

En France, ce type est représenté à *Château-Lambert* (Haute-Saône)² par un peu de molybdénite dans des filons de quartz cuprifères et par les filons cuprifères et plombifères à molybdénite accidentelle de *Corbières* (Hérault).

On trouve, dans l'*Arizona*, de la molybdénite en feuilles minces et inutilisables avec de la pyrite ou de la chalcopryrite. Un gisement de ce genre,

¹ Beck, *loc. cit.*, t. 1, p. 96. — Coll. Ec. d. M., 2892 (Bandakslid en Telemarken) et 2893 (Watterfjord pollen, Lofoten).

² Col. Ec. d. M., 2493.

dans les monts Santa Rita, contenait des cristaux plus développés de cette substance. La même région renferme, comme nous allons le voir, d'assez nombreux affleurements de molybdate de plomb.

Dans l'*Oregon*, la molybdénite apparaît également dans des filons de cuivre près de Galice (comté de Joséphine).

Au *Pérou*, dans la province de Jauja ¹, par 12°, on connaît de la molybdénite à Runatullo sous forme de filons-couches encaissés dans des quartzites. Ces filons sont formés de quartz blanc laiteux avec noyaux de molybdénite et mouches de chalcopryrite, pyrite et blende. A Callan, les conditions sont analogues. Ces gisements paraissent en rapport avec des roches granitiques.

2° WULFÉNITE SUR LES FILONS DE PLOMB

La wulfénite est un élément relativement fréquent sur les affleurements altérés de certains gisements de plomb, où elle accompagne la cérusite, l'anglésite, la pyromorphite, la mimétèse, etc. On a supposé que le molybdène pouvait exister en profondeur sous la forme de feuilles très minces, confondues avec la galène par leur aspect extérieur, tandis que, dans les produits altérés, la couleur jaune vif de la wulfénite la mettait en évidence. Il faut au moins supposer, en outre, une concentration du molybdène pour expliquer la teneur beaucoup plus forte aux affleurements.

Dans l'*Arizona* ², on a signalé, en divers points, sur des affleurements filoniens, du molybdate de plomb, qui avait été autrefois jeté aux résidus et que l'on a parfois recherché quand le molybdène a pris plus de valeur. Ainsi, à la mine d'or de Mammoth à Shultz, comté de Pinal, à la vieille mine de Yuma (30 k. N.-W. de Tucson), aux mines de plomb de Castle Dome, etc. Il était là souvent accompagné de vanadinite et de descloizite (chloro-vanadate et vanadate de plomb).

Dans l'*Utah*, la wulfénite existe assez abondante sur des filons de plomb, notamment à Alta.

Certains grands gisements de plomb de l'Ouest américain, comme *Eureka* en Nevada, sont remarquables par l'abondance de la wulfénite que nous aurons l'occasion d'y signaler (avec association de mimétèse) ³.

Dans le *Haut Mexique* on a exploité également des mines de wulfénite.

La wulfénite, à l'état de cristaux isolés, se rencontre dans beaucoup d'autres mines où l'on extrait le plomb, telles que : Bleiberg, Windich-Kappel et Schwarzenbach, en *Carinthie* ; Rezbanya, en *Hongrie* ; Przibram, en *Bohême* ; Moldova, au *Banat* ; Annaberg, Schneeberg, etc., en *Saxe* ; les grès plombifères de St-Avold, en *Prusse rhénane* ; Southampton, en *Massachusetts*.

Avec la wulfénite, on a trouvé, à Leadhills, en *Écosse*, un vanado-molybdate de plomb, nommé l'éosite.

¹ JOE BALTA. *Metales raros en el Peru* (Bol. Minas, anno 12, n° 7). — 1906. ENRIQUE DUENAS (Bol. Cuerpo Ing. Minas Peru, 35, p. 94). — 1908. WECWARTH. *Los metales raros y su exis. en los min. del Peru* (Bol. Cuerpo Ing. Minas Peru, n° 63, p. 52-59).

² 1907. REG. MEEKS. *Molybdenum* (Miner. Ind.).

³ A Leadville, il n'y a que de petites quantités de molybdène.

CHAPITRE XXV

SILICE ET SILICATES DIVERS

Si. = 28,3

I. — USAGES DE LA SILICE ET DES SILICATES

La silice libre et anhydre constitue : à l'état de cristallisation nette, le *quartz* employé comme *crystal de roche*, *caillou du Rhin*, *améthyste*, *œil-de-chat*, *aventurine* ; à l'état de cristallisation confuse, avec mélange d'opale, la *calcédoine* employée comme *cornaline*, *sardoine*, *jaspe sanguin*, *agate*, *onyx*, *chrysoprase* et le *silex*, qui est une véritable roche, formant les *meulières*, les *pierres de touche*, les *pierres à fusil*.

Les grains de quartz roulés composent les *sables quartzeux*, employés dans la fabrication du verre. La même fabrication se sert de quartz hyalins étonnés et utilise parfois des *silex* (flint : d'où flint glass).

Enfin la silice hydratée constitue l'*opale* et les carapaces siliceuses de végétaux, composées d'opale pulvérulente, donnent les *tripolis* et les *terres à infusoires*, employées pour la fabrication de la dynamite.

Parmi les très nombreux silicates, nous aurons à étudier : les *feldspaths*, qui servent comme dégraissants dans la pâte des porcelaines et comme fondants dans leurs couvertes ; les *argiles* et les *kaolins*, qui sont des silicates d'alumine produits par la décomposition de ces *feldspaths* ; les *ardoises*, qui sont des argiles modifiées par le métamorphisme.

La *leucite*, ou amphigène, est employée pour la fabrication de l'alun.

On utilise, en outre, comme pierres d'ornement : l'orthose, sous le nom de *Pierre de lune* de Ceylan ; le microcline, ou *Pierre des amazones* ; l'oligoclase, ou *Pierre du soleil* (ou aventurine), le *labrador* du Canada et de Norvège.

Le *mica blanc muscovite* (silicate alumino-potassique), et l'*amiante* (trémolite ou chrysolithe), ont des usages relativement importants.

Le *lapis-lazuli* (ou outremer) est une sorte de feldspath sulfaté avec chlore.

Quelques autres minéraux employés comme *gemmes*, la topaze, l'émeraude, la phénacite, l'olivine, la tourmaline, le grenat, etc., sont des silicates plus ou moins complexes.

II. — RÔLE GÉOLOGIQUE DU SILICIUM

Dans la constitution de l'écorce terrestre, la silice vient se placer à côté de l'alumine, avec laquelle les réactions ignées l'ont ordinairement com-

binée, tandis que les réactions aqueuses et surtout les altérations opérées par les eaux superficielles à la température ordinaire tendent à séparer ces deux corps pour amener leur cristallisation individuelle. On peut estimer que la proportion moyenne de silice dans les roches est d'environ 60 p. 100 contre 15,40 d'alumine¹.

C'est dire que toute l'écorce terrestre est essentiellement un silicate d'alumine, dans lequel entrent des proportions relativement faibles de fer, de calcium, de magnésium et de métaux alcalins. Au contraire, le silicium fait défaut dans l'atmosphère et (sauf des traces minimes) dans les eaux et toutes les vraisemblances sont également pour que son rôle disparaisse à une certaine profondeur dans la Terre au-dessous de son écorce silicatée. Quoique les météorites renferment encore un peu de silicium, la plupart des enseignements fournis par la métallogénie comme par la pétrographie conduisent à admettre une diminution de la teneur en silice dans les roches à mesure que l'on s'enfonce ; la scorie acide et légère, caractérisée par l'abondance de la silice, a tout naturellement dû flotter par liquation sur la scorie basique et lourde. La place du silicium dans l'échelle géologique est donc particulièrement bien définie². C'est, avec l'aluminium dont le poids atomique est presque le même (27, contre 28,3) l'élément caractéristique de cette zone périphérique qui sert de support à la vie.

Cette abondance du silicium dans l'écorce terrestre correspond à un nombre très grand de combinaisons minéralogiques. L'étude des silicates occupe la majeure partie de la minéralogie. Nous nous bornerons ici à examiner les quelques corps siliceux qui viennent d'être signalés comme utilisés par l'industrie.

1° QUARTZ. — CRISTAL DE ROCHE. — CAILLOU DU RHIN, ETC.

Rôle géologique du quartz. — La silice, que les actions ignées ont fait entrer dans des combinaisons silicatées diverses et qui, dans les roches cristallines, ne joue à l'état libre qu'un rôle de résidu restreint, a toujours eu tendance à cristalliser isolément dans les réactions aqueuses, soit dans les manifestations hydrothermales filoniennes, soit dans les altérations superficielles de la métasomatose. Des phénomènes très lents et très prolongés arrivent ainsi, même sans intervention de la pression, surtout lorsque les sels alcalins (carbonates ou chlorures) interviennent, à produire des remises en mouvement siliceuses à l'état de dissolutions extrêmement étendues ou de dilutions colloïdales, qui finissent par recristalliser. Un des effets les plus connus de ce transport siliceux constitue les bois silicifiés. On peut lui rattacher également les meulières produites par la décalcification de calcaires superficiels, les silex de la craie réalisés par groupement de silice, empruntée à des spicules de spongiaires, les bancs de silex intercalés dans certains terrains, les « jaspilites » et « jaspes » associés à tant de minerais de fer ou de man-

¹ *Science géologique*, p. 654.

² Voir plus haut, tome 1, pages 19 à 21 et 46.

ganèse, etc. Des cristaux isolés et nets peuvent également se former ainsi.

Cependant la cristallisation de la silice à formes nettes en éléments assez grands pour être utilisés a été surtout réalisée dans les filons hydrothermaux concrétionnés, ou dans certains filons ignés, pour lesquels le rôle des eaux chaudes paraît avoir été capital, comme les pegmatites. On sait qu'en minéralogie, l'on distingue la silice cristallisée en deux groupes : groupe du quartz (avec la quartzine et la lutécite) ; groupe de la tridymite. Dans les usages pratiques, le quartz est seul à considérer.

Variétés de quartz. — Le *cristal de roche*, employé en optique, dans l'orfèvrerie, etc., n'est autre chose que du quartz cristallisé dans les druses de certains filons : le plus souvent dans les pegmatites, qui fournissent en même temps le mica blanc et le feldspath ; quelquefois dans des fissures de roches gneissiques ou sédimentaires ; ou encore dans les filons métallifères.

De beaux échantillons sont venus autrefois des Alpes, de l'Oisans, où se trouvaient d'importantes « cristallières », du Saint-Gothard et du Tyrol. A une époque où le cristal de roche était particulièrement recherché pour l'orfèvrerie, avant que Venise ne fût arrivée à trouver un verre comparable à lui par son éclat et sa blancheur, c'étaient même les Alpes qui le fournissaient uniquement². De tels cristaux de quartz, roulés ensuite dans les alluvions, constituent le *caillou du Rhin*.

Une production beaucoup plus importante est fournie par le Brésil et par Madagascar.

A *Madagascar*, le quartz est recueilli au N.-E. et à l'E. de l'île dans des alluvions. Il est généralement désigné dans le commerce comme quartz de Vohémar du nom de son port d'embarquement et provient en partie du Maningory, en face l'île Sainte-Marie.

Son origine paraît être surtout dans des filons de pegmatite, qui produisent, en d'autres points, des tourmalines, béryls, kunzites, etc.³. On remarque, dans ses inclusions liquides, de l'acide carbonique et du chlorure de sodium avec de l'eau, qui peuvent renseigner sur son mode de cristallisation.

Quelques échantillons atteignent des dimensions colossales. On en a cité qui avaient 1 ou 2 m. de tour avec un poids de 300 à 400 kg.

Parmi les variétés de quartz, nous signalerons d'abord les *quartz enfumés*, dans lesquels on a signalé depuis longtemps un peu d'hydrocarbure. Ces minéraux, qui sont assez fréquents dans les Alpes, soulèvent un problème des plus curieux depuis que l'on a constaté la possibilité de donner au quartz incolore cette teinte enfumée en le soumettant à l'action du radium⁴. C'est ainsi que l'on a découvert, en 1867, près du glacier du Rhône, une grotte tapissée de cristaux de quartz du plus beau noir, dont on

¹ On en a observé dans les fentes du ciment romain de Plombières (LACROIX. *Minér. de la France*, t. 3, p. 102). Le quartz bipyramidé est également très fréquent dans les argiles gypseuses ou salifères et y présente la couleur du gypse encaissant. Ses formes nettes ne laissent pas supposer un emprunt à des roches détruites (*ibid.*, p. 109).

² LACROIX. *Min. de la France*, t. 3, p. 79. A La Lauze, près de Freney, en Dauphiné, on a exploité autrefois des filons de cristal de roche dans la protogine.

³ LACROIX. *Min. de la France*, t. 3, p. 88.

⁴ 1905. EGOROFF (C. R., 10 avril).

a extrait plus de 10 000 kg.¹. Etant donnée la radioactivité très fréquente des eaux souterraines, il est permis de supposer une influence de ce genre. Mais on se demande pourquoi le même phénomène ne se présente pas dans le quartz de filons métallifères.

L'*améthyste* est une variété de quartz violette (pouvant devenir verte par chauffage) et devant probablement sa coloration à du manganèse.

Les pierres les plus estimées viennent du Brésil et de l'Uruguay (amygdales de roches ignées), de Ceylan, des monts Oural, etc.

Aux Etats-Unis, on a trouvé, en 1902, dans le comté de Nelson (Virginia), près Lowesville, des améthystes remarquablement belles encaissées dans une pegmatite. On les a exploitées activement en 1907².

Le quartz *topaze* est jaune. L'*œil de tigre* est fibreux avec des nuances jaunes. L'*œil-de-chat* est rendu chatoyant par des inclusions fibreuses parallèles d'amphibole. De longues aiguilles de rutile incluses dans le quartz constituent les *cheveux de Vénus*, etc.

2° CORNALINE, SARDOINE, AGATE, ETC.

Les calcédoines sont des produits assez homogènes, formés d'éléments siliceux fibreux mélangés d'un peu d'opale. La dissolution de cette opale par altération superficielle donne la croûte blanche qui entoure les silex noirs et qui forme la patine des silex préhistoriques. La calcédoine devient alors poreuse, puis pulvérulente. La présence de cette opale contribue, sans doute, à la facilité avec laquelle les calcédoines reçoivent souvent une teinture.

La calcédoine, en masse sphéroïdale concrétionnée ou stalactiforme, avec un peu d'opale, prend le nom de *cornaline* quand elle est rouge, de *sardoine* quand elle est brune avec couleur rouge sang par transmission, de *chrysoprase* quand elle est vert pomme, de *plasma* quand elle est vert sombre, d'*héliotrope* quand elle est verte avec des taches rouge sang, d'*agate* quand elle est divisée en zones concentriques de coloration diverse. On réserve le nom d'*onyx* à des variétés d'agate, dans lesquelles les zones successives sont planes et dessinent en coupe des bandes parallèles. Ces onyx sont employés pour les camées. Il ne faut pas les confondre avec les marbres onyx calcaires, dont il sera question plus loin³.

Les calcédoines se rencontrent d'ordinaire dans des géodes de roches volcaniques. Quelquefois leur partie centrale contient des pointements de quartz hyalin ou d'améthyste; elle peut également englober des cavités closes remplies d'eau (*enhydres*).

Les agates se trouvent également dans des roches amygdaloïdes, où la silice paraît avoir pénétré d'abord par porosité pour se déposer ensuite sur les parois des cavités intérieures.

C'est souvent dans des alluvions de rivière, à l'état de galets roulés, qu'on exploite ces diverses pierres. L'on modifie généralement leurs

¹ Le cristal noir valait à ce moment 12 fr. le kg., tandis que le quartz blanc, moins à la mode, n'en valait que 4 (Ann. d. M., 6^e, 15, p. 169).

² 1902. *Mineral Resources of U. S.*, p. 851. — *The Min. Ind.* for. 1907, p. 790.

³ Tome 2, p. 175 et 180.

teintes par divers moyens physiques ou chimiques : ainsi à Oberstein, dans le Palatinat, où il s'en fait une certaine industrie.

Les mines de cornaline de l'État de Bombay, près de *Broach* (Barouch)¹ sont anciennement célèbres; mais leur exploitation est très déchuë. En 1905, on a extrait, dans l'État de Rajpipla (Bombay), 467 t. de cornaline valant 100.000 fr.

Cette région de *Broach* (ou *Barouch*) et de *Cambay*, située au Nord de Bombay, sur la côte Ouest de l'Inde, jouit d'une très vieille réputation pour la production et la taille des agates et on prétend même que les vases murrhins de Pline étaient des coupes d'agate provenant de ce pays, (quoique d'autres auteurs aient pensé à la fluorine). Le plus grand nombre des agates que l'on vend en Europe dans les villes d'eaux, bains de mer, etc., vient de là.

Géologiquement, l'origine des agates est dans les géodes des trapps, qui couvrent les immenses espaces du *Dekan*, ou, plus rarement, dans d'autres roches éruptives antérieures. Partant de là, ces noyaux durs se sont concentrés en galets dans des graviers d'alluvions, ou conglomérats plus ou moins anciens.

Les centres de production sont à des distances très variables de *Broach*, où se centralisent la taille et le commerce des agates.

Ainsi l'on en trouve à *Paithan*, ou *Pithana*, par 75° 28' sur le Godavéry, dans des graviers ossifères. Newbold² a donné toute une liste d'autres localités situées sur les trapps du Dekan, où l'on a recueilli des agates.

Dans le Bengale, sur les *Rajmahal Hills*, des blocs d'agate inutilisés se rencontrent dans des trapps d'âge liasique.

Dans le Chota Nagpur, certains bancs de jaspe zonés apparaissent au milieu des terrains précambriens et fournissent des galets dans les rivières.

Les trapps du district de Jabalpur, dans les provinces centrales, passent pour l'origine des aventurines que l'on a imitées à Venise et d'une grande partie des onyx taillés à *Cambay*.

Enfin, l'une des mines les mieux connues est celle de *Ratanpur*, qui, pendant des siècles, a fourni la majeure partie des agates et cornalines indoues. On y trouve les pierres dans un banc mince de gravier tertiaire ferrugineux, qui en est presque exclusivement formé et qui lui-même les a empruntées au trapp voisin.

En Asie-Mineure, dans le *Pont*, on a récolté, depuis longtemps, sur la côte, vers Kerasoun et Trébizonde, des agates, onyx et jaspes, qui

¹ Ce mot, anglicanisé, vient du français broche. — Voir : 1815. COPLAND. *Account of the Cornelian mines in the neighbourhood of Broach* (Trans. Lit. Soc. Bombay, 1, 289-295). — 1854. A. SUMMERS. *Statement of the wrought Agates, Cornelians, etc., together with the varied processes of preparation, and value of the Trade at Cambay* (Sel. Rec. Bo. Gov., new series, t. 4, p. 26-36). — 1856. COPLAND. *Sur la mine de Cornaline de Barotch entre Bombay et Brouda* (B. S. G. F., t. 13, p. 669-670). — 1857. COPLAND. *Account of the Cornelian mines in the neighbourhood...* (Western India, 491-495). — 1866. W.-T. BLANFORD. *On worked agates of the early stone age from Central India* (Proc. As. Soc. Beng., p. 230-234). — 1869. W. THEOBALD. *Notes on some Agate Beads from North-Western India* (Proc. As. Soc. Beng., 253). — 1881. BALL. *Economic geology*, p. 503. — 1909. L. DE LAUNAY. *Agates et cornalines* (La Nature, 17 juillet 1887). — L. DE LAUNAY. *Rich. min. de l'Asie*, p. 118 et 712.

² Journ. Roy. As. Soc. 20, p. 17.

entraient déjà dans les trésors célèbres de Mithridate conquis par Pompée. Le cours inférieur de l'Halys (Kizil-irmak), et du Thermodon (à l'Est de l'Yeckil Irmak) fournissent, notamment, beaucoup de ces pierres. On signale particulièrement, près du Thermodon, le port d'Ounieh, d'où l'on extrait des dalles calcaires rouges et blanches renfermant des bancs d'un jaspe ondulé susceptible d'un beau poli. C'est de là, suivant Hamilton, que Mithridate aurait tiré les vases de jaspe qu'il se plaisait à montrer à ses hôtes.

3° MEULIÈRE, SILEX, JASPE, PIERRE DE TOUCHE, ETC.

Les *meulières* du bassin de Paris sont des roches siliceuses criblées de cavités, que l'on utilise pour la construction ou pour la fabrication des meules. Leurs conditions de gisement sont très irrégulières ; on les trouve en lits discontinus et brisés, ou en rognons, dans l'argile ferrugineuse. C'est, en effet, un produit de la décalcification superficielle opérée sur des calcaires siliceux lacustres, avec précipitation de l'argile et remise en mouvement de la silice.

Cette remise en mouvement a pu avoir lieu sur des terrains d'âges divers quand, formant des plateaux, ils n'étaient pas protégés contre l'altération superficielle par un manteau d'autres terrains. Les deux niveaux principaux sont, dans le bassin de Paris, le sannoisien (La Ferté-sous-Jouarre) et l'aquitainien (Meudon, Montmorency). Un phénomène analogue a produit les blocs silicifiés, ou « perrons », que l'on trouve, par exemple, sur les plateaux crétacés de la Normandie, du Perche, etc.

Les *silex* résultent d'une reprécipitation siliceuse ayant, sur des points favorables, concentré la silice, qui était d'abord disséminée dans les terrains (spicules d'éponges, carapaces de radiolaires ou de diatomées). Ce phénomène, qui se manifeste surtout clairement dans les terrains secondaires et tertiaires, semble d'autant plus avancé que le terrain est plus ancien. Dans les *chailles* jurassiques, comme dans les *phlanites* (silex noir) du carbonifère, la quartzification est complète ; les silex de la craie contiennent encore beaucoup d'opale mélangée avec le quartz et les silex tertiaires en sont souvent presque uniquement formés.

Les *jaspes* sont des roches siliceuses compactes, douées d'une opacité complète et souvent teintées de rouge, brun, jaune, vert ou noir par un mélange d'oxydes de fer ou d'argile avec le quartz. Le *jaspe sanguin* est une variété rouge. La *Pierre de touche*, que l'on utilise pour les essais de métaux précieux¹, est noire. Certains jaspes sont susceptibles d'un beau poli.

Les *pierres à aiguiser*, *pierres à faux*, *novaculites* (pierres à rasoir) et *pierres à huile* (*oilstones*), utilisées pour aiguiser et froter, sont, en général, des grès très fins ou des phyllades intercalés dans les terrains primaires ou les micaschistes et devant à une multitude de petits cristaux une dureté spéciale. Pendant longtemps, on a exploité aux États-Unis, dans l'Indiana (comté d'Orange), une pierre à huile, dite pierre de l'Indoustan ou

¹ Voir 1872. DUMAS. (Bull. des anc. élèves de l'École des Mines, n° 27) et ROSWAG. *Métallurgie de l'argent*, p. 143.

encore grès de cordonnier, pour laquelle les cordonniers étaient, en effet, les principaux consommateurs. La production a fortement diminué par suite du développement de la cordonnerie mécanique ; elle était, en 1892, d'environ 70 t. On connaît également aux Etats-Unis, sous le nom de pierres de Washita et de l'Arkansas, des novaculites exploitées en grand depuis 1840 et dont on produit environ 200 à 300 t. valant 160 à 200 fr. la tonne.

On exploite encore, à Grafton Cy (New Hampshire) dans le micaschiste et à Indian Pond, (même comté), des bancs de grès fin employés comme pierre à faux.

4° SABLES QUARTZEUX ET QUARTZ HYALINS POUR VERRERIE

Les sables ont un certain nombre d'emplois dans la construction, les fonderies, le jardinage, etc. Mais ils ne prennent de valeur que lorsqu'ils sont assez fins et blancs pour pouvoir être utilisés dans la verrerie fine et la glacerie¹. Dans les glaces de Saint-Gobain, il entre 37 p. 100 de sable quartzeux très blanc ; dans le verre blanc de Bohême 55 p. 100 de quartz hyalin pulvérisé ; dans les verres à bouteilles, que l'on cherche à faire plus fusibles, seulement 16 p. 100 de sable quartzeux. Les bases associées peuvent être, on le sait : soude et chaux (verres à vitres, glaces) ; potasse et chaux (verre de Bohême, crown glass) ; potasse et plomb (cristal, flint glass, etc.).

Un sable assez chargé en fer pour n'être propre qu'à la fabrication des bouteilles ne vaut guère plus de 4 à 5 fr. la t., soit 8 à 10 fr. le mètre cube dans un des ports du littoral français. Au contraire, un sable très pur, très blanc et très fin, comme le sont certains sables de Fontainebleau et Nemours, qui ont un véritable monopole à cet égard, peut atteindre un prix beaucoup plus élevé. Mais il ne faut pas oublier que les frais de transport interviennent pour un chiffre important.

Par exemple, à Nemours, il existe une exploitation de sable, qui produit par an 30 à 40.000 t. de sables, vendus aux glacières de France, d'Amérique, de Russie, etc. Le terrain utilisable occupe 40 hectares. Il y a, à la surface, 10 à 12 m. de mauvais sable à enlever. Après quoi, on trouve environ 10 m. de sable fin. Le sable très blanc se vend 4 fr. la tonne sur bateau à Nemours. On a des sous-produits jaunes ou ferrugineux, qu'on vend 2,50 la t. pour les fonderies, pour la fabrication des meules artificielles, etc. On produit, en même temps, une certaine quantité de grès. Le sable fin est vendu tel quel sans pulvérisation ni tamisage et contient plus de 99 p. 100 de silice.

Ailleurs, en Bohême, on emploie, pour la verrerie, des quartz hyalins étonnés, encore plus purs que ces sables. Les Anglais ont également utilisé des silex (flint) pour le flint glass².

¹ Voir : *Mineral industry for 1910*, p. 21 (Glass Sand). Les Etats-Unis produisent environ 1 MT de sable pour verrerie à 5 fr., surtout dans la Pennsylvanie et l'Illinois.

² Les galets de silex des plages normandes, qui sont souvent en silice très pure, servent pour les faïences fines (terre de fer), pour les carreaux en grès cérame et pour le broyage des substances que saliraient des billes de fer. On a extrait, en 1907, 120 000 t. vendus de 4 à 20 fr. la t. (E.-A. MAUREL. *La Nature*, 20 août 1910.)

Silice fondue. — On sait que, dans la fabrication du verre, on peut forcer davantage la teneur en silice, sauf à obtenir des produits moins fusibles. Dans le verre blanc ordinaire, on prend trois parties de sable siliceux, pour 1 partie de carbonate de calcium et 1 partie 1/2 de carbonate de soude. Dans certains verres de Bohême, pour une proportion de bases à peine plus forte (1 de carbonate de calcium calciné et 2 de carbonate de potassium), on arrive à 7 de quartz hyalin, que l'on emploie après l'avoir étonné au feu, puis désagrégé en le jetant dans l'eau. On est parvenu à faire dans ces derniers temps, à des températures très élevées, un *verre de silex*, dans la composition duquel entre de l'amianté.

Enfin, grâce au four électrique, l'on commence à obtenir à 1900° de l'anhydride silicique fondue, vitrifiée par fusion, qui possède la propriété remarquable de ne pas se rompre sous n'importe quelle température. En optique, le quartz pur ainsi fondu a, d'autre part, la propriété de laisser passer les radiations de courte longueur d'onde. Le gramme de ce nouveau verre revient encore à environ 1 fr. On se borne donc, jusqu'ici, à en confectionner des appareils de laboratoire¹.

5° OPALE

L'opale noble est remarquable par la beauté de ses reflets irisés, dus : suivant les uns, à des fentes de retrait remplies par des exsudations de densité légèrement différente ; suivant d'autres, à une petite quantité de matière hydrocarburée. Les plus belles opales proviennent de *Hongrie*, où on les trouve en petites veines au milieu de trachytes et de tufs trachytiques, à Czerwemitza, etc...

Le *Mexique* produit en abondance de l'opale commune, qui vaut très bon marché parce qu'au bout d'un certain temps elle craque et perd sa couleur². L'opale commune et claire de Gueretaro se vend par grandes quantités depuis 0,15 fr. la pièce. Mais on trouve également, dans le même pays et dans les mêmes conditions de gisement, au milieu des trachytes et rhyolites, des opales couleur de feu et rouge hyacinthe, qui valent depuis 50 jusqu'à 500 fr. Ces opales de feu viennent notamment de Zimapan (Hidalgo), de San Nicolas del Oro et d'Huitzucó (Guerrero). Enfin il existe, au Mexique, des opales ne présentant qu'une seule couleur très accentuée, rouge, verte ou jaune, qui sont alors supérieures aux opales de Hongrie. A la Hacienda de la Esperanza (Queretaro), on a trouvé de belles opales laiteuses ; dans l'état de Jalisco, des opales-agates à plusieurs teintes.

En 1890, on a découvert aux *Etats-Unis*, à la limite de l'Idaho et du Wisconsin, près Whelan, au S.-W. de Colfax, de l'opale de feu remplissant les vacuoles d'un basalte amygdaloïde et on a pu en vendre une petite quantité au même prix que l'opale de Hongrie.

¹ Voir : 1909. J. HENRIVAUX. *Verre de silice* (La Nature, 8 oct., n° 1898). — 1912. BILLON-DAGUERRE. *La fusion du quartz pur* (C. R., 19 fév.). — Il est intéressant de noter que les tubes et récipients en silice fondue, chauffés au rouge, sont perméables aux gaz, au point de pouvoir être assimilés à des membranes susceptibles d'endosmose et d'exosmose.

² 1902. *Le Mexique au début du XX^e siècle*, p. 289. — L. DE LAUNAY. *Mines et industries minières du Mexique*.

D'ailleurs, il est très fréquent de rencontrer un peu partout des veines d'opale dans les trachytes, sans que celle-ci ait les belles colorations qui la font estimer ; on en trouve aussi dans des serpentines, en relation avec des concentrations de fer chromé (Mételin, etc.).

Depuis quelques années, le *New South Wales* a commencé également à fournir des opales près de White Cliffs, à Lightning Ride ¹, etc. Un grand nombre de ces opales sont des pseudomorphoses de glauberite ou de gypse ; ou encore elles ont remplacé du bois, des os de reptiles, des vertèbres de sauriens, des coquilles, dont on voit encore la structure. On y a découvert, en 1906, un gisement remarquable d'opales noires, présentant par endroits de très belles couleurs bleues, vertes, rouge feu : notamment une masse d'opale de 2,5 kg. vendue 25 000 fr.

6° TRIPOLI ET TERRES D'INFUSOIRES ²

Tripoli. — On désigne, sous le nom de tripoli, dans le commerce, des produits très variés rouges ou jaunes utilisés pour le polissage. Les véritables tripolis, ou farines fossiles siliceuses, sont composés d'opale pulvérolente. Nous allons y revenir en étudiant les terres d'infusoires qui s'en distinguent par leur emploi.

Le tripoli de *Menat* (Puy-de-Dôme), qui ne mérite pas, en minéralogie, le nom de tripoli ³, est obtenu par la calcination de schistes tréssiliceux renfermant 62 p. 100 de silice, 28 p. 100 de matière carbonée et 9 p. 100 d'eau ammoniacale, que l'on calcine à l'air libre pour obtenir un produit siliceux un peu rougeâtre. On l'a souvent décrit, à tort, comme formé de diatomées.

Le tripoli de *Poligné* (Ille-et-Vilaine) provient également de la combustion (mais naturelle et spontanée dans ce cas) des ampélites siluriennes ⁴, qui sont formées de grains de quartz avec une forte proportion de pyrite et de matières décarburées.

Terres d'infusoires. — La grande diffusion du silicium dans le règne minéral entraîne sa présence dans les organismes, où la silice semble jouer, pour les cellules, un rôle de charpente solide, qui a été surtout bien reconnu pour les plantes, mais qui se manifeste aussi pour les animaux ⁵. A l'état de dissolution extrêmement étendue, comme beaucoup d'eaux (et notamment d'eaux thermales) en présentent, la silice peut être introduite dans l'organisme et s'y fixer ; elle est surtout abondante dans les

¹ 1882. ROBERTSON. *Occurr. of opal in Queensland.* — 1906. ANDERSON, *Records of Australian Museum Sydney*, 69-79. — *The mineral industry during 1907*, p. 809.

² 1893. FRÈRE HERIBAUD. *Diatomées d'Auvergne* (Clermont-Ferrand). — 1896. Z. f. pr. G., p. 27. — 1902. BLAKE. *Terres à diatomées de l'Arizona* (Am. I. M. E. Philadelphia meeting, 8 p.). — BÜNTE. *Die Diatomeen Schichten von Lüneburg, Lauenburg, Boizenburg, und Wendisch-Wehningen.* — 1910. SCHMIDT. *Les gisements de tripoli* (Kieselguhr) en France et en Allemagne (Ann. d. M., avril, p. 370 à 386).

³ Voir plus haut, tome 1, pages 467 et 468.

⁴ Voir plus haut, sur les ampélites, tome 1, page 431.

⁵ 1892. BERTHELOT et ANDRÉ. (An. Ch. Ph., 6°, t. 27, p. 145). — 1902. SCHUTZ. (Münch. med. Woch., p. 440). L'emploi thérapeutique de certaines eaux thermales (Baignoles de l'Orne, etc.) est peut-être dû à une action de ce genre.

tissus conjonctifs et dans le tissu embryonnaire. Cette fixation de la silice par divers organismes aboutit, en géologie, à la constitution de terrains spéciaux, formés par leurs débris (diatomées, radiolaires, spicules d'éponges mélangés aux craies).

Les terres d'infusoires (tripoli ou kieselguhr) sont formées par des carcasses siliceuses de diatomées, qui apparaissent particulièrement bien au microscope quand on a commencé par attaquer à l'acide sulfurique et laver ensuite. Les espèces *gallionella*, *mélosira* sont très visibles. Mais les terres de la meilleure qualité sont formées d'aiguilles ayant environ un dixième de millimètre de long. La constitution de ces terres les rend à la fois très légères et très poreuses. Dans l'antiquité, on en fabriquait des briques, qui, d'après Strabon, flottaient sur l'eau et avec lesquelles fut construite la coupole de Sainte-Sophie. Aujourd'hui on s'en sert surtout pour absorber la nitroglycérine. Quand on veut obtenir des résultats convenables dans la fabrication de la dynamite, il faut une terre ne renfermant que de la silice sans alumine ni oxyde de fer. La qualité de la terre est ainsi caractérisée par la teneur en silice, qui atteint 90 p. 100. Les matières organiques ne gênent pas. Pour améliorer la qualité, on opère une préparation mécanique, qui n'est cependant possible que lorsque la teneur en argile initiale est suffisamment faible (2 à 3 p. 100).

Géologiquement, ces terres d'infusoires se sont déposées depuis le miocène supérieur jusqu'à l'époque actuelle dans des dépressions marécageuses.

En pratique, le grand centre de production se trouve dans la lande de *Lüneburg*, près de Unterlüss, au Nord du Hanovre. Les gisements, d'âge pléistocène, sont incorporés dans les terrains morainiques sur 3 km. de long et 1 km. de large. On exploite jusqu'à 15 à 20 m. de profondeur, où l'on est arrêté par l'eau.

Le tripoli, assez fortement chargé de matières organiques, renferme de 2 à 3 p. 100 d'alumine et d'oxyde de fer.

Un autre gisement allemand, découvert en 1855, se trouve au *Vogelsberg*, près d'Altenschlirf (grand-duché de Hesse). Le tripoli repose sur des tufs basaltiques, recouverts par 3 à 5 m. d'argiles tertiaires, par-dessus lesquelles a coulé un basalte. La couche, épaisse de 5 à 7 m., a pu être suivie sur 600 m. de long.

Depuis quelques années, on exploite, dans le *Cantal*, un certain nombre de petits gisements découverts aux environs de Murat, par Pagès-Allary, dans la vallée de l'Alagnon à Joursac, Celles-Neussargues et Auxillac. Ces gisements correspondent, sous leur forme primitive, à une série de lacs restreints, datant du miocène supérieur, par-dessus les dépôts desquels ont passé ultérieurement des basaltes. Il existe, en outre, des produits de remaniement. La carrière de la Société « Kieselguhr français », près Auxillac, a déjà produit 3 000 t. Son épaisseur est de 15 m. A Joursac, la superposition des basaltes aux couches de tripoli est particulièrement nette ; ces couches, un peu trop alumineuses, sont riches en plantes fossiles. Dans l'une des carrières de Neussargues, le tripoli, épais de 10 m. et contenant une mince couche de schiste, s'intercale entre deux coulées de basalte. Il a subi un plissement.

On peut encore citer les tripolis quaternaires (randannites) de Ceysnat,

Randanne, etc., près de Clermont-Ferrand, qui n'ont pas de valeur. De tels dépôts se forment encore aujourd'hui en Auvergne dans la région du lac d'Aydat.

7° FELDSPATHS ¹

Lien théorique des feldspaths, argiles, schistes et ardoises. — Les feldspaths sont les formes minéralogiques les plus habituelles sous lesquelles la silice et l'alumine, combinées avec d'autres bases alcalines ou alcalines terreuses, se fixent dans l'écorce silicatée de la Terre. Leur étude tient une grande place en minéralogie et en pétrographie. Attaqués par l'altération superficielle, ces feldspaths subissent des modifications diverses que la chimie ne reproduit pas encore complètement et dont la plus intéressante pour les feldspaths acides (orthose, microcline, albite) est une kaolinisation. Celle-ci se traduit par la dissolution et le départ des bases associées à l'alumine. Suivant la nature de la roche et le mode de décomposition, ils constituent alors sur place des gisements de kaolin, ou laissent simplement une arène désagrégée ayant perdu une grande partie de son feldspath. Bientôt une grande partie des silicates d'alumine, qui sont le résidu de cette attaque, entrent en suspension dans les eaux et vont former ailleurs des sédiments plus ou moins fins, plus ou moins chargés de quartz ou d'éléments calcaires, argiles, marnes, etc. Ultérieurement, les argiles ont pu être soumises à un métamorphisme, qui a donné des schistes, des ardoises, ou qui même a pu, par feldspathisation nouvelle, reproduire des roches cristallines. Enfin, tous les sédiments, à leur tour, sont susceptibles d'une altération superficielle, dont le processus, toujours le même, a pour résultat, ici encore, d'éliminer la chaux soluble : d'où une autre catégorie d'argiles, ayant parcouru, dans ce cycle compliqué, une phase de plus. Des terrains contenant du feldspath clastique ont pu donner ainsi du kaolin, en quelque sorte sédimentaire. Nous allons examiner ici les principaux éléments utilisables de ce groupe en commençant par les feldspaths et laissant de côté les produits où l'alumine est arrivée à s'isoler presque entièrement, comme les alumines et les bauxites, qui trouveront leur place naturelle au chapitre de l'aluminium.

Usages des feldspaths. — Les feldspaths trouvent leur principal emploi dans la fabrication de la porcelaine. Plus fusibles que le kaolin et le quartz, ils jouent le rôle de dégraissant dans la pâte et servent également dans la couverte.

Les fabriques de briques émaillées, d'émeri, de carborundum, en absorbent également une certaine quantité.

Le feldspath est, en outre, utilisé dans la fabrication du verre, dans celle du savon, dans la dentisterie. On a également reconnu la possibilité

¹ 1896. KATZER. *Böhmens Feldspath Industrie* (Oest. Z. f. B. u. H. Wien, t. 44, 11 p.). — Cf. Z. f. pr. G., 1898, p. 172). — 1899. *Feldspath Ausfuhr Norwegens* (Z. f. pr. G., p. 148). — 1900. ZELIZKO. *Das Feldspath Vorkommen in Süd-Böhmen* (Oest. Z. f. B. u. H., p. 669-671). — 1902. *Feldspath et talc de l'Ontario* (Z. f. pr. G., p. 71). — 1911. E.-S. BASTIN. *Feldspar* (Bull. U. S. geol. Surv. n° 445, 152 p.).

d'utiliser certains feldspaths finement moulus comme engrais potassiques¹, notamment pour la culture du tabac. Mais, dans cet ordre d'idées, on a surtout organisé, en ces dernières années, la fabrication de zéolites artificielles². Rappelons enfin l'existence, signalée plus haut³, des feldspaths utilisés dans la bijouterie et l'ornementation.

Production. — Les feldspaths, étant des minéraux d'une grande banalité, ne sont exploités que lorsqu'ils se présentent en grandes masses, associés à d'autres minéraux utiles et constituant un sous-produit de leur exploitation, ou encore lorsqu'ils ont pris, par la cristallisation, une beauté spéciale susceptible de les faire utiliser dans l'ornementation (Ceylan, Norvège, Labrador, etc.).

Parmi les pays producteurs en grand du feldspath, on doit citer d'abord, en Europe, la *Scandinavie*, qui exporte chaque année environ pour 400 000 fr. d'orthose et de microcline.

Les *Etats-Unis* produisent entre 70 000 t. de feldspath (1907) et 82 000 (1910), valant : pour les meilleures qualités, 60 à 80 fr. la tonne ; pour la moyenne, 25 à 30 fr.

Les carrières sont dans le Connecticut (comtés d'Hartford et Middlesex), dans le Maine, dans le Maryland (Baltimore) et dans l'Etat de New-York.

Le Canada produit également 16 000 t. de feldspath (1910).

Géologie. — Les plus beaux cristaux de feldspath viennent des granulites et pegmatites, dans lesquelles ils sont associés avec tout un groupe de minéraux caractéristiques, cristal de roche, mica blanc, tourmaline, topaze, émeraude, cassitérite, etc. Les fabriques de porcelaine tirent souvent le feldspath, employé dans la pâte et dans la couverte, des mêmes carrières qui produisent le kaolin.

C'est dans des gisements du même genre que l'on trouve les feldspaths employés dans l'ornementation : pierre de lune, microcline ou amazonite⁴, etc.

Leucite. — La leucite, ou amphigène, est une sorte de feldspath potassique, très abondant dans les laves du Vésuve et de la Campagne Romaine et dont on a organisé, en 1902, l'exploitation industrielle pour faire de l'alun.

Depuis longtemps, on exploitait les sables à leucite comme pouzzolanes quand on a eu l'idée de soumettre la roche pulvérisée à un traitement électro-magnétique, dans lequel les autres éléments de la roche, étant ferrugineux (augite, magnétite, etc.), sont plus facilement attirables par l'aimant. On prétend ainsi enrichir à 90 p. 100 de leucite : leucite qui renferme elle-même 15 à 22 p. 100 de potasse, avec 55 p. 100 d'alumine. Le résultat donne trois produits : leucite (non magnétique) ; silicates du

¹ 1907. Bull. n° 104. U. S. Dept. of agriculture. Bureau of Plant Industrie. — 1914. MACHALSKE. *Feldspar as a source of Potash* (Ann. fertilizer, 11 mars).

² Voir à ce sujet, tome 2, p. 101, le chapitre du Potassium.

³ Page 789.

⁴ La variété de microcline vert émeraude, dite Amazonite, tire son nom du grand fleuve brésilien. Elle a eu une grande vogue au xviii^e siècle et passait alors, comme la néphrite (ou jade), avec laquelle Buffon la confondait encore, pour guérir les coliques néphrétiques, d'où le nom de néphrite (*La Nature*, 9 déc. 1905, sup.).

magma basaltique (paramagnétiques) ; magnétite (ferromagnétique). Ayant isolé la leucite, on lui ajoute de l'acide sulfurique pour obtenir de l'alun, qui, par son mode de préparation même, est particulièrement exempt de fer, cet « ennemi de l'alun ». L'opération commerciale a, croyons-nous, donné des déboires.

8° ARGILES ET KAOLINS

Constitution chimique. — Les silicates d'alumine hydratés, connus sous le nom d'argiles, kaolins, etc., sont utilisés dans l'industrie pour la fabrication des briques, poteries, matériaux réfractaires, faïences, porcelaines. Ce sont, en dépit de leur apparence, généralement des substances cristallisées, formées de lamelles très enchevêtrées¹.

Leur composition chimique est assez variable et l'on a eu quelque peine à les spécifier minéralogiquement, d'autant plus qu'il y a d'ordinaire mélange avec des produits clastiques divers. Néanmoins, sur des échantillons purs, H. Le Chatelier y est parvenu en étudiant leur température de déshydratation : c'est-à-dire en déterminant le moment où, lorsqu'on les chauffe, il se produit un ralentissement dans l'élévation de température. Il est arrivé ainsi à les classer en cinq catégories distinctes, dont deux seulement, les halloysites et les kaolins, ont une réelle importance et qui ne présentent généralement pas de mélanges entre elles :

1° Le premier groupe, celui des *halloysites*, est de beaucoup le plus abondant ; il comprend la majeure partie des argiles chimiques et presque la totalité des argiles sédimentaires. Nous citerons : les halloysites d'Angleur (Belgique), de Russie, de Miglos (Ariège), de Laumède (Dordogne), de Huelgoat (Finistère), de Breteuil (Eure), le savon blanc de Plombières, les bauxites, etc. ; puis l'argile réfractaire de Forges (Seine-Inférieure) et de Bolène (Vaucluse), l'argile plastique de Gentilly (Seine).

Les argiles sédimentaires sont formées, d'après les travaux de Schloësing, par un mélange complexe de quartz, de silicate d'alumine cristallisée et d'argile colloïdale.

Les argiles chimiques ont, au contraire, après départ de l'eau hygrométrique à 250°, une composition très régulière correspondant à 48 de silice et 36 p. 100 d'alumine et représentée par la formule $H^3Al^3Si^2O^8 + Aq.$ ($2SiO^2Al^2O^3, 2H^2O$).

Cette formule se différencie de celle des kaolinites, ou kaolins, par un peu plus d'oxygène, ou un peu moins d'alumine par rapport à la silice.

2° Le deuxième groupe est celui des *kaolins*, dont la formule chimique est $H^3Al^3Si^2O^8 + Aq$: soit 46,5 de silice, 39,5 d'alumine et 14 p. 100 d'eau. On les distingue des halloysites par leur inattaquabilité aux acides et par un dégagement de chaleur à 100°.

¹ 1877. LE CHATELIER. *De l'action de la chaleur sur les argiles et leur constitution* (C. R. de l'Acad. des Sc., 23 et 31 mai). — Les recherches de Grandjean sur la coloration des argiles, ou plus généralement sur leur faculté d'absorption, montrent qu'une argile quelconque doit être considérée comme un silicate d'alumine à composition définie ayant absorbé des matières étrangères diverses. La glauconie, par exemple, est d'abord une argile incolore, sans fer ni potasse, qui commence par brunir en se chargeant de fer et verdir en s'enrichissant de potasse (*Rev. de Métallurgie*, mars 1910).

Puis viennent des types moins répandus :

3° Les *allophanes* comprenant un petit nombre d'argiles de Saint-Antoine (Oise), de Firmy (Aveyron), de Vizé, de l'Utah (Amérique), etc., dont la formule est $\text{Al}^2\text{O}^3, \text{SiO}^2 + 5\text{H}^2\text{O}$;

5° Les *pyrophyllites* (type : Beresowsk dans l'Oural), dont la formule est $\text{H}^2 \text{Al}^2 \text{Si}^4 \text{O}^{12} (4\text{SiO}^2, \text{Al}^2\text{O}^3, \text{H}^2\text{O})$;

5° Les *montmorillonites*, de formule $\text{H}^2 \text{Al}^2 \text{Si}^4 \text{O}^{12} + \text{Aq}$, mais généralement impures. Dans ce groupe rentrent la stéargillite de Poitiers (Vienne), les argiles smectiques de Reigate (Angleterre) et de Styrie.

Toutes les argiles sont, nous l'avons dit, le résultat, plus ou moins direct, plus ou moins ancien, de la décomposition des feldspaths du granite : décomposition qui a pu, soit se produire sur place, soit être accompagnée d'un transport et d'une concentration sédimentaires.

A. — ARGILES POUR TUILERIES, BRIQUES RÉFRACTAIRES, etc.

Une argile commune suffit pour la fabrication des briques ou des tuiles plates ; la production des tuiles à emboîtement demande, au contraire, des qualités très fines, homogènes, ne contenant ni calcaire en grains qui, à la cuisson, se boursoufflerait, ni grains de quartz ou de pyrite qui détruiraient l'homogénéité, ni cailloux qui gêneraient le travail des malaxeurs.

On peut apprécier l'argile en faisant des prises d'essai en divers points de la carrière, et les soumettant à un lavage.

L'argile extraite peut rarement servir sans mélange. Le plus souvent, après l'avoir découpée en tranches et mouillée, on la laisse pourrir dans un fossé avec des lits alternants d'autres argiles, de sciure de bois, de poussière de coke, etc.

L'installation d'une tuilerie mécanique exige une force motrice d'au moins un cheval pour 1 000 tuiles par jour ; la cuisson se fait le plus souvent dans des fours continus Hoffmann passant environ 30 m³ par jour.

Les *terres réfractaires* sont l'objet d'exploitations assez importantes à Bollène près Avignon ; à Andenne¹ en Belgique ; en Seine-et-Marne, etc.

Les terres réfractaires de Belgique sont préparées en mélangeant trois cinquièmes de terre grasse et deux cinquièmes de terre crue. On fait d'abord le mélange intime à sec ; on ajoute 12 p. 100 d'eau et on malaxe. Les mouffes à zinc sont obtenus à la presse hydraulique sous une pression de 150 atmosphères. La cuisson se fait dans un four de 10 m. de haut et 6 m. de diamètre, où 70 t. de terre séjournent 48 heures.

L'extraction des argiles réfractaires est montée en France, en 1909, à 326 000 t. comptées sur la carrière à 7,50 fr. (59 000 t. en Saône-et-Loire, 50 000 t. en Indre-et-Loire, 48 000 en Vaucluse, etc.).

B. — KAOLIN

Historique et usages. — Le kaolin est l'élément essentiel de la fabrica-

¹ La terre noire d'Andenne tient, crue, 56,40 de silice, 25,70 d'alumine, 2,7 de fer, 0,84 de chaux, 14,40 de perte au feu et vaut 16 fr. rendue à l'usine de Noyelles-Godault. La terre grasse de Saint-Loup, qui vaut 20 fr., tient 53,80 de silice, 31,23 d'alumine, 2,92 de fer, 0,40 de chaux, 11,15 de perte au feu. Dans la demi-grasse de Montreaux, la silice monte à 70, avec 21 d'alumine et 6,50 de perte au feu.

tion de la porcelaine. Il paraît avoir été utilisé pour la première fois en Chine sous l'empereur Han, vers 185 avant notre ère. Les Chinois commencèrent par fabriquer de la porcelaine bleue jusque vers 581 avant Jésus-Christ; vers 618, apparaît la porcelaine verte; puis, en 960, la porcelaine craquelée dite « bleu du ciel après la pluie ».

Vers 1710, le kaolin, dont un missionnaire français, François Xavier d'Entrerolles, avait reconnu le rôle dans la fabrication chinoise, fut retrouvé, par hasard, en Saxe et l'on se mit à l'utiliser dans ce pays, à Albrechtsburg, près de Meissen. Puis, peu à peu, malgré toutes les précautions prises pour conserver le procédé secret, des fabriques s'établirent en divers points de l'Europe.

En France, on avait commencé à fabriquer, de 1695 à 1700, la porcelaine dite tendre, qui est beaucoup plus un verre qu'une porcelaine et où il entre à peine d'éléments argileux : porcelaine faite avec une fritte composée de sable, nitre, gypse, alun et sel marin, chauffée presque jusqu'à fusion, puis écrasée ou mélangée à de la marne et de la craie. En 1756, fut fondée la manufacture de Sèvres, et, en 1760 seulement, Guettard découvrit le premier kaolin français, aussitôt employé à la confection de la porcelaine dure. Ce kaolin, assez impur, se trouvait à Alençon. Enfin, en 1768, Dauret trouva le kaolin de Saint-Yrieix.

Aujourd'hui, les éléments d'une pâte à porcelaine se composent essentiellement de kaolin, principe argileux infusible, de feldspath fusible dégraissant, de quartz et de chaux. La pâte de service de Sèvres, ou pâte de fabrication courante, peut servir de type. Elle se compose, d'après Brongniart, de : kaolin de Saint-Yrieix ; sable d'Aumont; feldspath de Saint-Yrieix et craie de Bougival.

Ces éléments sont associés en proportions variables, suivant leur composition, de manière à donner un mélange qui contient toujours le même dosage, savoir : 58 p. 100 de silice, 34,5 d'alumine, 4,5 de chaux et 3 de potasse.

Sa glaçure, ou *couverte*, est formée de feldspath quartzeux, tantôt seul, tantôt mélangé avec du gypse.

Les fabricants de Paris emploient généralement, pour leur pâte, 80 de kaolin et 20 de feldspath.

La préparation comprend, d'abord, un malaxage et un marchage; puis on laisse la pâte pourrir, on la reprend pour la battre; on la mélange d'eau intimement, et l'on a une bouillie liquide, dite *barbotine*, qui peut être travaillée au tour, moulée ou coulée. Après quoi, on dégorde par une cuisson légère, et on recouvre, par immersions, par immersions, d'une glaçure, qui est ensuite vitrifiée par une cuisson définitive.

Conditions économiques du commerce du kaolin en France. — Le kaolin, et surtout le kaolin de première qualité, est, en somme, d'un usage assez restreint. La belle porcelaine a à lutter contre la faïence, beaucoup moins chère et susceptible d'un éclat, d'une coloration plus brillantes¹. Dans ces conditions, les gîtes actuellement exploités en Limousin, en

¹ En France, l'industrie de la porcelaine occupe environ 10.000 ouvriers, et les produits ont une valeur de 36 millions par an; la faïence en emploie 8.000 et produit 43 millions.

Bourbonnais, en Saxe, en Angleterre, etc., suffisent, et au delà, à la consommation. Beaucoup des mines de kaolin ne se sauvent que par une série d'usages accessoires, parmi lesquels il faut bien signaler la falsification; on se sert de kaolin pour alourdir le papier, on le mêle alors à la pâte en additionnant d'une émulsion d'amidon pour faire adhérer; on en utilise pour les draps, etc. En outre, on en emploie une petite proportion pour le bleu d'outre-mer.

La France a produit, en 1907, 76 000 t. de kaolin ayant une valeur moyenne de 21,60; elle en a importé, en outre, 52 000. En 1909, on a produit 73 700 t. à 24 fr. et exporté 57 000 t. de kaolin. Sur la production, la Haute-Vienne entre pour 13 400 t. à environ 70 fr., la Nièvre pour 16 000 t. à 60 fr., l'Allier pour 15 000 t. à 17 fr., le Morbihan pour 7 000 t. à 22 fr.

En France, le Limousin (Saint-Yrieix et Coussac) reste toujours un centre de production important pour les qualités supérieures; mais, pour les qualités secondaires, les fabriques mêmes de Limoges importent une quantité notable d'autres kaolins: soit de kaolins français de l'Allier, soit de kaolins anglais (Saint-Austell, etc.). On admettait, il y a peu d'années, que Limoges importait, par an, 3 500 t. de kaolins anglais, autant d'autres kaolins français, et consommait 3 à 4 000 t. de kaolins de Saint-Yrieix: soit au total environ 11 000 t.

Vierzon emploie une proportion encore plus forte de kaolins anglais.

Les prix de vente respectifs expliquent aisément cette introduction de produits étrangers, contre laquelle luttent les tarifs de douane.

Les décantées anglaises extra, en baisse par suite de la concurrence des diverses mines, arrivent en effet, en gare de Paris, à 68 fr. la tonne, à 80 fr. en Auvergne ou dans le Berry; les décantées de second ordre reviennent à 50 ou 60 fr. à l'usine. Au contraire, les premières qualités de Saint-Yrieix, qui sont seules propres à la fabrication des pièces extra, se vendent jusqu'à 120 fr. Néanmoins ces produits supérieurs, sur leur marché restreint, conservent la préférence. Mais, pour les pâtes communes, pour les faïences, la pâte de papier, etc., on a besoin de produits moins chers. Les kaolins de Saint-Yrieix sont, dès lors, utilisés pour durcir la pâte anglaise, qui serait trop friable. Comme celle-ci serait également trop peu fusible, on y ajoute, en général, un peu de blanc de Meudon.

Voici les prix approximatifs des diverses sortes de Saint-Yrieix rendues à l'usine:

Cailloux	25 à 30 fr.	la tonne au plus.	
Caillouteuse . .	20	50	} pour des kaolins absolument blancs.
Sablonneuse . .	60	80	
Kaolin pur . . .	100	125	la tonne.

La consommation de ces derniers kaolins purs est à peine de 200 à 300 t. par an.

Si l'on veut se rendre compte de l'état de cette industrie dans le centre de la France, il faut, en outre, faire intervenir la consommation des sablons de Decize et de Drevant près Saint-Amand, des kaolins à bon marché du Dauphiné, des Eyzies et surtout de l'Allier.

Le prix de revient du sablon de Decize n'est guère que de 3 fr. 50 en

carrière. Si l'on y ajoute les frais divers, tels que 2 fr. de lavage, 1 fr. 50 de séchage, 4 fr. de mouture, les transports, les intérêts et amortissements, on arrive à environ 20 francs.

Nous aurons d'ailleurs à insister, à propos de tel ou tel gisement spécial, sur la préparation et le prix de revient des kaolins.

Géologie du kaolin¹. — Le kaolin — ou, pour employer un terme plus minéralogique, la kaolinite —, est incontestablement un produit de la décomposition des feldspaths acides, orthose, microcline, albite. Le silicate double d'alumine et d'alcalis, qui constitue ces feldspaths, livre aux eaux sa potasse ou sa soude à l'état de silicates solubles ou de produits colloïdaux² et le résidu est le silicate d'alumine $H^4Al^2Si^2O^8$. La réaction laisse d'abord un minéral d'un blanc mat et poreux, qui garde la structure extérieure du feldspath initial. On a ainsi des roches ayant encore l'apparence d'une granulite avec substitution du kaolin à l'orthose (caillouteuses des exploitants); puis ce minéral se désagrège, tombe en poussière et est emporté par l'eau, laissant sur place une arène granitique, tandis que le kaolin entraîné peut se rassembler au voisinage.

Sur cette relation d'origine entre le kaolin et le feldspath, les géologues sont, depuis longtemps, d'accord; mais, pendant longtemps, on a fait intervenir, pour expliquer la décomposition, des actions électriques (Brongniart et Malagutti, en 1841); puis on a rapproché la kaolinisation de la présence des filons stannifères et on en a fait un phénomène ancien, concomitant des remplissages filoniens hydrothermaux, pouvant par conséquent se rencontrer à toutes profondeurs (Daubrée)³. Cette théorie

¹ 1850. *Kaolin produit par la décomposition du beryl* (B. S. G. F., 2^e, t. 7, p. 224). — 1874. SCHLOESING. *Sur la const. des argiles et kaolins* (C. R., t. 79, p. 376 et 473). — 1877. *Kaolins du Lot-et-Garonne, de Lombardie, de Thuringe; kaolinisation* (Revue de géologie, par A. DE LAPPARENT. ANN. D. M., 7^e, t. 13, p. 364). — 1877. COLINS. *The China-clay and chinastone of Devon and Cornwall* (Crookes J. of Sc.). — 1880-81. FONTANNES. *Terrains des environs de Bollène* (B. S. G. F., 3^e, t. 9, p. 438). — 1880. DUPONT. *Histoire du kaolin*. — 1884. HILLS. *Kaolinite from red mountain* (New-Haven, Americ. Jour. of Sc., t. 27, p. 472). — 1887. LE CHATELIER. *Constitution des argiles* (C. R., 31 mai). — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souterraines anciennes* (p. 179 et 313). — Juillet 1891. *Journal officiel*. Discussion à la Chambre des tarifs de douane sur le kaolin. — 1896. KASAI. *Die wasserhaltigen Aluminium Silikate*. — RÖSLER. *Beiträge zur Kenntn. ein. Kaolinlagerst.* (J. f. Min., t. 15, p. 23). — 1908. STREMMER. *Ueber Kaolinbildung* (Z. f. pr. G., p. 122 et J. f. Min., 1909, t. 2, p. 9). — 1909. BARNITZKE. *Ueher das Vork. der Porzellanerde bei Meissen u. Halle* (Z. f. pr. G., p. 457). — 1909. CORNU. *Die heutige Verwitterungslehre im Lichte der Kolloid Chemie* (Z. f. Chem. u. Ind. der Kolloide, mai). — 1914. MADDALENA. *Le nuove vedute sull' origine del Caolino e il giac. di Tretto* (Vicenza) (Rassegna min., 21 janv.).

² Cf. LEMBERG. (Zeitschrift d. Deut. géolog. G., t. 28, p. 596), et Rev. de géol., par DELESSE et DE LAPPARENT. ANN. D. M., 7^e, t. 13, p. 507.

³ En 1824, de Buch, dans sa description du Harz, a émis l'opinion que le kaolin des environs de Halle, en Prusse, devait son origine à l'intervention de l'acide hydrofluorique sur le porphyre où se trouve ce kaolin et en a donné pour preuve la présence de nombreux cristaux de fluorine dans la masse décomposée. Plus tard, Daubrée a signalé encore, notamment à Carclaze et à Huelgoat, la substitution de cristaux de cassitérite et de quartz à du feldspath comme une preuve que celui-ci avait bien été attaqué en ce point par les agents stannifères. On a remarqué également que les roches spéciales, par lesquelles l'étain est d'ordinaire accompagné et auxquelles on donne les noms locaux de schorl, zwilfer, greisen, etc., roches composées de quartz et de mica, ressemblent à des granulites dont le feldspath aurait disparu.

était presque universellement admise il y a quelques années. Récemment encore, elle était soutenue par Weinschenk. Il ne me paraît pas douteux qu'il faille l'abandonner et que le kaolin soit un produit d'altération presque superficielle dans la zone que nous avons appelée zone de céméntation: altération en rapport avec la circulation active des eaux faiblement acidulées contenant de l'acide carbonique, et accessoirement de l'acide nitrique ou des acides organiques, comme tous les autres produits de la décalcification et de la céméntation, etc., précédemment étudiés. Le seul lien que l'on puisse encore admettre entre le kaolin et les filons métallifères est, très hypothétiquement, l'activité spéciale communiquée aux eaux par les traces de fluor, de chlore, d'acide sulfurique, etc., au contact de ces filons.

La théorie que nous adoptons ainsi est tout d'abord fondée sur la limitation absolument constante des gisements kaoliniques en profondeur. Toutes les carrières de kaolin descendues assez bas rencontrent des roches granitiques de plus en plus dures et, finalement, des roches intactes. Si, le long de certains filons métallifères (Pontgibaud, Broken Hill, etc.), on voit le kaolin se prolonger à une certaine profondeur et avoir un certain lien avec la nature de la métallisation, c'est parce que, le long de ces filons, la circulation, qualifiée ici de superficielle, s'est trouvée, en raison de circonstances topographiques spéciales, descendre plus bas que d'habitude¹. Les filons de quartz, quelquefois stannifères comme cela arrive fréquemment pour les quartz des granulites, ont joué leur rôle ordinaire de plans directeurs pour la circulation des eaux et c'est uniquement à cette influence qu'est due la localisation (d'ailleurs très nette) de beaucoup d'amas kaoliniques le long de semblables filons².

On a, il est vrai, établi une distinction justifiée entre l'altération superficielle pure et simple caractérisée par des réactions oxydantes avec peroxydation du fer et conservation d'une partie des alcalis et la kaolinisation, qui paraît s'être opérée dans une atmosphère réductrice; mais c'est la distinction ordinaire entre les deux zones de la peroxydation et de la céméntation que nous avons toujours eu soin de distinguer et il n'est nullement nécessaire d'en conclure, comme on l'a supposé bizarrement, que les kaolins soient liés à la présence de lignites ou de tourbières ayant donné des acides organiques: Tout au plus a-t-on le droit de songer à des conditions de température un peu élevées qui auraient caractérisé l'époque

¹ C'est ainsi qu'auprès de Bône en Algérie, Parran (B. S. G. F., 4 juin 1883, p. 509) a décrit, dans des *gneiss* granulitisés, des veines de kaolin, dont la disposition rappellerait les gisements de Saint-Yrieix et qui persistaient à 70 m. de profondeur avec la même intensité qu'aux affleurements. Mais nous avons suffisamment insisté, t. 1, p. 184, sur les profondeurs, parfois très grandes, jusqu'auxquelles se prolongent des phénomènes divers, considérés par nous comme d'ordre absolument superficiel.

² A Saint-Yrieix et Coussac, les filons de granulite, étant minces, ont joué eux-mêmes cette action directrice sur les phénomènes de kaolinisation, qui est si nette pour les quartz des Colettes. Une action directrice du même genre sur des eaux superficielles ou souterraines est, sans doute aussi, la cause de l'altération profonde que nous avons pu constater maintes fois le long des grands filons de quartz du Plateau Central et qui les enveloppe presque toujours d'une zone limoneuse de plusieurs centaines de mètres.

éocène et en raison desquelles certaines réactions se seraient trouvées alors facilitées.

Nous allons voir l'application de ces idées en décrivant quelques grands gisements de kaolin français. Nous étudierons d'abord, à Saint-Yrieix, en Limousin, des veines de pegmatite surchargées en feldspath, ayant dû à cette circonstance de donner des kaolins exceptionnellement fins et purs ; nous trouverons ensuite à Ambazac, dans la Haute-Vienne, aux Colettes et à Beauvoir, dans l'Allier, un grand massif de granulite décomposé en kaolin le long de certains filons de quartz. Tous les gisements de kaolin primitifs que nous pourrions étudier dans beaucoup d'autres pays, à Saint-Austell, en Cornwall, à Geyer ou Weiss-Andreas, en Saxe, en Chine, dans l'Inde, etc., sont ainsi exclusivement placés sur des granulites ou pegmatites encaissées au milieu de terrains schisteux, qui ont pu contribuer à faciliter l'infiltration des eaux. Leur existence est fréquente dans de tels massifs, quand ils ont un relief suffisant : par conséquent, un niveau hydrostatique assez profond pour permettre une circulation notable des eaux. Par contre, là où cette condition n'est pas réalisée par suite d'un aplanissement trop avancé du pays, comme en Norvège, en Finlande, au Canada, etc., on ne trouve pas, en général, de kaolin utilisable, mais souvent de beaux feldspaths intacts. Après ces exemples de gisements primitifs, nous examinerons des gisements stratifiés d'un tout autre type, où le kaolin résulte d'une préparation mécanique sédimentaire, qui a pu concentrer, soit du kaolin déjà formé, soit, beaucoup plus tôt sans doute, du feldspath destiné à subir une kaolinisation ultérieure.

KAOLIN DE SAINT-YRIEIX (Coussac-Bonneval)¹.

Les massifs de granite à mica blanc, encaissés dans les schistes et lançant au milieu de ceux-ci des veines de granulite fine ou de pegmatite, sont un des traits les plus caractéristiques de la chaîne hercynienne, dans le Plateau Central comme dans le Nord-Ouest de l'Espagne, en Bohême et en Saxe ou dans le Cornwall. On y observe fréquemment une kaolinisation pouvant donner lieu à des exploitations industrielles. De telles exploitation abondent notamment dans le Limousin : soit au N.-E. de Limoges, dans la direction d'Ambazac ; soit au S.-E., près de Saint-Yrieix. Les premiers gisements rentrent dans un type que nous étudierons tout à l'heure aux Colettes, dans l'Allier. Le kaolin y est mélangé de tous les éléments ordinaires d'une granulite, roche dont il affecte encore l'apparence extérieure (quartz, micas, etc...) ; dans les seconds, le kaolin peut être très pur, ou simplement mêlé de quartz, aisé à en séparer. Cette différence, à laquelle on a cherché des causes plus ou moins romanesques, tient uniquement à ce que les premiers kaolins sont dus à l'altération des feldspaths dans des granites à mica blanc (granulites françaises), qui ont con-

¹ Coll. Ecole des Mines, 1937. — 1880. *Société des kaolins de Saint-Yrieix (Haute-Vienne). Notice historique.* — LEVERRIER, Feuille géologique de Limoges. — 1903. L. DE LAUNAY, *Notes sur la théorie des gîtes minéraux. Observations sur les kaolins de Saint-Yrieix* (Ann. d. M., janvier).

servé toute leur structure, et les autres à l'altération de pegmatites proprement dites, et même de roches exclusivement feldspathiques, comme il s'en rencontre dans les granulites (orthose, microcline, albite).

Les carrières de kaolin, dites de Saint-Yrieix, s'alignent sur 15 à 20 km. de long, à l'Est de Saint-Yrieix (feuille de Tulle), vers Marcognac, Coussac-Bonneval et Mongibaud (fig. 122), à travers un plateau peu accidenté, oscillant entre les cotes 360 et 400 (exceptionnellement 450), qui apparaît, de divers côtés, perforé d'anciennes excavations ou couvert de vieilles haldes. Deux petites carrières prolongent cette zone à l'Ouest, vers Jumilhac.

Ces carrières, anciennement renommées (depuis 1765) pour la qualité supérieure du kaolin qu'elles produisent, n'ont, individuellement, qu'une existence précaire. On n'y descend pas à plus de 30 ou 40 m. de profondeur; bientôt l'on est obligé d'abandonner une exploitation pour en commencer une autre et, malgré le développement considérable des gisements sur une longue zone, il en est résulté, à la longue, une diminution fatale de l'activité, qui se traduit aujourd'hui par une grande réduction dans la production. Actuellement on ne travaille un peu activement qu'à Marcognac, et faiblement à Bois-Vicomte, près de Marsac et vers Fruger, sur les zones mises en relief dans la figure 122, mais principalement sur les trois premières.

Quoique les frais croissants de l'exploitation, et surtout l'épuisement en profondeur, ou la concurrence des kaolins anglais, y soient pour beaucoup, ce caractère

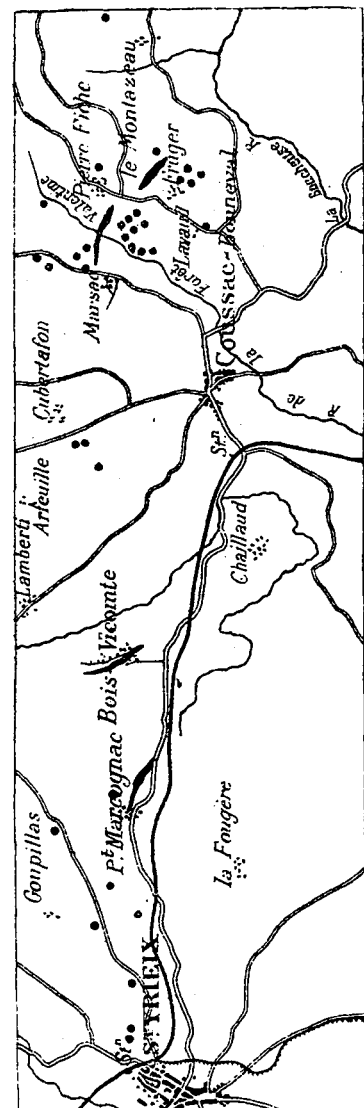


Fig. 122. — Carte au 1/102 000^e de la région des kaolins de Saint-Yrieix.

Les points noirs représentent les anciennes carrières; les traînées noires, les zones sur lesquelles il existe encore des exploitations.

précaire des travaux suffirait à indiquer la disposition superficielle du kaolin. Cela ne veut pas dire cependant que l'on trouve toujours immédiatement le kaolin à la surface; les gisements, qui se trouvaient dans ces conditions et qui ont attiré l'attention les premiers, paraissent avoir été, depuis longtemps, dépilés, et l'on s'attaque aujourd'hui, de préfé-

rence, soit par des carrières à ciel ouvert, soit par des puits de recherches, à des veines, situées parfois à 15 ou 20 m. de profondeur, comme le montre, par exemple, la figure 123, mais toujours dans la zone où se sont fait sentir les altérations, qualifiées par nous de superficielles.

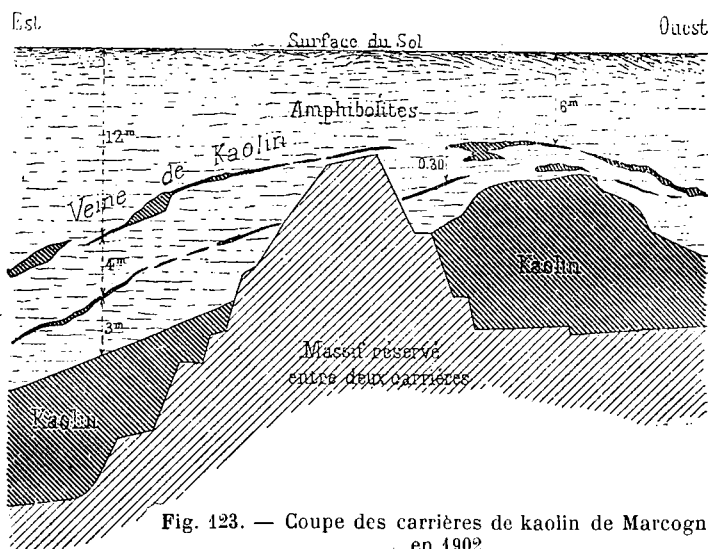


Fig. 123. — Coupe des carrières de kaolin de Marcognac en 1902.

La région considérée est surtout formée de schistes micacés très riches en mica blanc, avec amphibolites et leptynites, que traversent un très grand nombre de veines granulitiques remarquablement exemptes de mica et formées, par conséquent, de feldspath avec du quartz, sur lesquelles s'est opéré la kaolinisation. Contrairement à ce qui se présente le plus souvent dans le Plateau Central, ces micaschistes et amphibolites sont fort peu inclinés.

Plusieurs des veines kaoliniques exploitées sont au milieu des amphibolites, dont la couleur noire fait particulièrement bien ressortir la blancheur du kaolin. Tel est le cas pour les carrières de Marcognac, représentées par la figure 123.

La pegmatite présente, en ce point, des facies très variables, auxquels correspondent des variétés de kaolin. Elle passe parfois à des granulites à gros grains, mais sans mica, ailleurs à de véritables pegmatites graphiques ou à des aplites. Certaines parties, que l'on néglige, sont un peu rosées par du fer ; ailleurs, on a des veines de pur feldspath blanc, intercalées dans l'amphibolite (sur 0,10 m. ou 0,20 de large). Les veines de quartz sont rares ; mais on en rencontre ; elles se présentent parfois associées avec des produits noirs manganésifères, qui résultent d'une concentration superficielle, en rapport possible avec la kaolinisation elle-même.

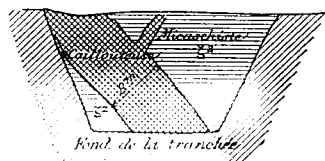


Fig. 124. — Coupe verticale à la carrière de Sainte-Valérie.

Dans les carrières situées à l'Est de Marsac, on peut observer des phénomènes analogues. Vers l'Ouest, un puits va chercher, à quelques mètres de profondeur, sous les schistes micacés, une veine de pegmatite blanche, accompagnée d'un peu de pegmatite rose et épaisse de 4 m. Plus à l'Est, dans une grande carrière voisine aujourd'hui abandonnée, la même veine apparaît, sur 0,80 m., très visiblement bordée sur ses salbandes d'une trainée feldspathique, ayant 0,10 m. de large, qui donne du kaolin presque pur.

Enfin, près de Fruger, à l'Est de Coussac, où il existe beaucoup d'an-

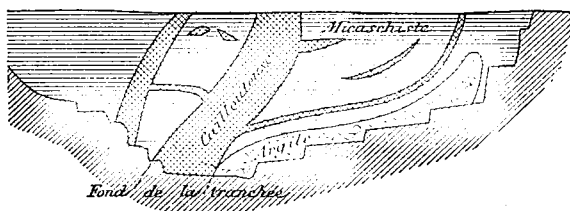


Fig. 125. — Coupe verticale de la carrière de Saint-Antoine.

ciennes carrières et de haldes, qui rendent l'observation du terrain difficile, les veines de pegmatite paraissent s'être formées, au moins en partie, dans des amphibolites à gros grenats dont on retrouve les débris abondants ; les produits manganésifères sont fréquents.

C'est dans cette région de Coussac que les explications étaient le plus actives, vers 1885, quand Ed. Fuchs a étudié la région. Nous reproduisons ici trois croquis faits par lui (fig. 124 à 126). Ce qu'on appelle la « caillouteuse » est de la granulite ou de la pegmatite entièrement

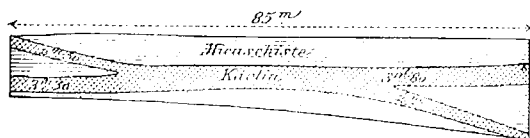


Fig. 126. — Coupe horizontale de la carrière de Saint-Bonnet.

décomposée, mais gardant son aspect extérieur, sauf la teinte blanche spéciale (ou parfois rosée) prise par le kaolin en se décomposant. L'argile pure correspond simplement à un noyau feldspathique kaolinisé. Ces noyaux feldspathiques peuvent, tantôt se trouver dans une poche isolée, comme à la carrière de Saint-Antoine (fig. 125), tantôt, au contraire, exister dans l'axe de la granulite, comme cela avait lieu à Grand-Clos dans un filon de 2^m,50 d'épaisseur.

Le résidu siliceux, que laisse la kaolinisation des feldspaths, apparaît parfois sous la forme de veinules ; parfois, aussi, il s'est concentré sur les épontes et les a durcies.

En résumé, on est là en présence d'un système nettement intrusif de veines de pegmatites assez minces (au maximum 7 à 8 m.) dans des schistes micacés et des amphibolites. Ces veines ont toute l'irrégularité

que l'on est habitué à rencontrer en pareil cas et dont il serait facile de multiplier les figures dans toutes les régions schisteuses infiltrées de granulite. Elles ont subi une altération récente, qui s'arrête en profondeur, et la valeur spéciale des kaolins tient à ce que le feldspath s'est trouvé là presque isolé ou seulement associé avec du quartz, et exempt de mica, sans qu'il y ait besoin d'invoquer un transport ou une concentration secondaire pour expliquer la formation de ces kaolins particulièrement purs.

Industrie. — On distingue, en ce qui concerne la nature du kaolin, les classes suivantes :

1° La *granulite non décomposée*, appelée dans ce pays « caillou à émail » ;

2° La *granulite à demi décomposée*, encore solide, qui demande un broyage avant d'être vendue. — Prix 30 à 40 fr. la tonne, pour la première blancheur¹ ;

3° La *granulite entièrement décomposée* ou « caillouteuse », mélange de kaolin, quartz et mica blanc accidentel. — 20 à 50 fr. la tonne ;

4° La *sablonneuse*, feldspath décomposé contenant encore quelques grains très fins de quartz et feldspath ;

5° Le *kaolin pur* ou « argile », feldspath décomposé à peu près pur, contenant environ : 36,25 p. 100 de silice, 33,25 d'alumine et 12,00 d'eau, avec un résidu formé de quartz impalpable et d'un peu de feldspath non décomposé ; il se vend environ 100 francs la tonne.

Comme préparation, le kaolin brut n'a besoin que d'être débarrassé par lavage du mica et, jusqu'à un certain point, du quartz.

En pratique, à Limoges et dans le Berry, on fait le broyage du kaolin brut et on y ajoute des proportions variables de kaolin anglais, de sablons de Decize et de craie de Meudon destinée à donner de la fusibilité. La roche exploitée comme kaolin fournit elle-même, avec l'argile, du quartz et du feldspath.

Le *broyage* s'effectue, dans la plupart des moulins de Limoges, avec des petites meules pleines tournant sur une meule fixe circulaire de 0,70 m. de diamètre. Les deux meules sont au fond d'un bassin ou cuve en bois rempli de pâte liquide. Ces petits moulins ne passent que 100 kg. à peine par jour. Ils tendent à être abandonnés. On les a remplacés, en partie, par des moulins à blocs de 2 m. de diamètre susceptibles d'une production beaucoup plus forte.

Avec le système limousin, une paire de meules produit environ 75 à 100 kg. par vingt-quatre heures et dure deux ans. Il y a d'ailleurs à tenir compte, dans l'établissement du prix de revient, de ce que la moitié seulement des matières nécessaires pour faire la pâte a passé par le broyage. 100 paires de meules occupent 25 ouvriers et nécessitent, en outre, 3 concasseurs, 2 lavoirs et plusieurs pressoirs. Les frais de broyage atteignent dès lors environ 10 fr. par tonne : d'où, pour 500 kg., 5 fr.

Puis la matière venant des meules doit être filtrée et séchée partielle-

¹ Nous donnons ces prix, variables suivant les époques, uniquement pour préciser les rapports de valeur entre les diverses qualités.

ment. Le *filtrage* s'opère sur une étoffe pelucheuse, à l'aide du vide ou de la force centrifuge (essoreuse); cette simple opération donne aux pâtes une consistance suffisante pour qu'elles puissent être manipulées et conduites au séchoir.

Ces *séchoirs* sont de simples claies bien abritées, sur lesquelles on place des lopins de pâte, qui y perdent une partie de leur eau par évaporation; 1 m³ suffit environ pour 100 kg. de matière broyée. Après quoi, pour préparer la *barbotine*, un mélange est fait de cette pâte aux divers autres éléments dans des proportions que l'analyse chimique fait connaître et un malaxage très perfectionné donne au produit une grande homogénéité.

En résumé, les frais spéciaux sont de 12 fr. par tonne dont 5 fr. de broyage, 3,20 fr. de décantation, 0,75 fr. de filtrage, 0,83 fr. de mélange, 1 fr. de séchage. Les frais généraux et intérêts de fond de roulement pour l'usine seraient d'environ 3 fr.; soit 15 fr. pour la fabrication. Quant à l'extraction du kaolin, frais généraux compris, elle peut être estimée à 35 fr. Une tonne de pâte revient donc à environ 60 fr. Le prix de vente est : à Limoges, pour les pâtes ordinaires, de 90 à 120 fr.; pour les pâtes extra, de 180 à 250 fr.

KAOLIN DES COLETTES (Allier)¹

Les gisements de kaolin des Colettes et de Beauvoir, près Echassières, sont situés dans un même massif de granulite, isolé au milieu de mica-schistes sur lesquels il a exercé une action métamorphisante, et recoupé par de nombreux filons de quartz, généralement dirigés Nord 25° Est et épais de 0,80 m. à 2 m.

La granulite contient de la cassitérite, du mica lithinifère lépidolithe et un peu de turquoise semblable à celle de Montebbras (Creuse). Au voisinage des filons de quartz, suivant des bandes parallèles à eux et exclusivement auprès d'eux², elle a subi une décomposition sur place, sans transport, qui lui a laissé son aspect habituel et sa couleur, tout en transformant le feldspath en kaolin. La kaolinisation cesse nettement à 30 ou 40 m. de profondeur et, dans la carrière des Colettes, on voit les caux sourdre en abondance à la base de la tranchée, le long des filons de quartz, même au mois d'août. Cette granulite kaolinisée que l'on exploite, roche correspondante à la caillouteuse de Saint-Yrieix, est formée de quartz, feldspath et mica, et disposée suivant des sortes de filons ayant depuis quelques centimètres jusqu'à plusieurs mètres d'épaisseur, se réduisant parfois en profondeur et quelquefois augmentant de largeur après avoir diminué avec une complète irrégularité.

Les exploitations portent sur deux centres principaux, les Colettes et Echassières (Beauvoir) : ce dernier presque au contact du micaschiste

¹ 1869. DAUBRÉE (C. R., t. 68, p. 4135). — L. DE LAUNAY (1888. B. S. G. F., p. 1669; 1896. *Feuille de Gannat* au 1 : 80; 1900. *Excursion à quelques gîtes du Plateau Central*. Rapports du Congrès géol., p. 48 à 20); 1901. *La Nature*, 9 fév., n° 1446.

² Ce rôle des filons de quartz, quelque interprétation qu'on en veuille chercher, est frappant et très net. On aurait pu se demander s'ils ne représenteraient pas le résidu siliceux de la décomposition des feldspaths; mais ils se poursuivent dans la granulite inaltérée.

dont on trouve des fragments pincés dans la granulite. Elles occupent environ 300 ouvriers et produisent 50 à 60 t. par jour.

Aux Colettes, les travaux ont commencé en 1852 et comprennent : 1° la grande tranchée dont le développement est de plus de 5 hectares et la profondeur maxima de 45 mètres; 2° la carrière du Puy-de-Juillat, qui occupe 2 hectares et a 17 mètres de profondeur.

La roche extraite subit une préparation mécanique par densité, destinée à la débarrasser du quartz et du mica, d'abord dans des rigoles d'eau courante au fond des tranchées, puis dans des bassins de dépôt à la surface. Le quartz et le mica noir se déposent les premiers, puis le mica blanc et, à la fin seulement, le kaolin. Pour terminer, on soumet ce kaolin à un tamisage à travers des cylindres formés d'une toile extrêmement fine (200 mailles au centimètre carré) afin d'enlever les dernières parcelles de mica blanc.

La valeur du kaolin, peu rémunératrice, varie de 15 à 50 fr. la tonne.

KAOLINS RHÉTIENS DE LA NIÈVRE¹

Comme types de kaolins sédimentaires, nous décrirons les sablons de la Nièvre, que nous avons étudiés en 1887.

L'infralias gréseux, ou rhétien, est représenté, dans la Nièvre, par une couche de sables et de grès arkosiques peu épaisse, au-dessous desquels commencent aussitôt les grès micacés et argiles rouges avec cordons de gypse du trias; au-dessus desquels reposent, par contre, les calcaires foie de veau de l'hettangien.

La hauteur de la couche de sables est de quelques mètres à peine. Elle renferme des bancs de grès dur et des couches de sablons friables plus ou moins altérés, et présentant des lits d'argile blanche assez discontinus.

Le sablon lui-même est formé de grains de quartz arrondis et englobés dans une argile kaolinique dont la proportion varie de 15 à 25 p. 100. La constitution d'un tel terrain rend très vraisemblable l'altération presque sur place d'une arkose à grains feldspathiques; car, si le kaolin avait été formé d'abord, il se serait sans doute séparé du quartz par lévigation.

Les points d'exploitation sont : 1° Decize, derrière la gare du chemin de fer; 2° Vaux, en aval d'Avril; 3° Les Bruyères-Jaugery non loin de Fleury-sur-Loire; 4° Azy-le-Vif; 5° Chantenay; 6° le château de la Barre, au S.-W. de Saint-Pierre-le-Moutier; 7° Claire-Fontaine, près le Pont-du-Verdre. Ce sablon kaolinique, qu'il suffit de laver pour en extraire l'argile, trouve son emploi dans les faïenceries et fabriques de porcelaine assez fréquentes en cette région : Nevers, Gien, Couleuvre (Allier).

KAOLINS DE THURINGE²

Les kaolins de Thuringe exploités sur une grande échelle, sont à rapprocher des gisements de la Nièvre, comme formant des couches dans la partie moyenne du grès bigarré. On distingue :

¹ 1884. LEFORT. *Sur la formation du kaolin rhétien dans la Nièvre.*— Feuille géologique de Nevers au 1/80.000.

² SCHMID. (Z. d. D. geol. G., t. 28, p. 87; cf. Ann. d. M., 7^e. t. 13, p. 365).

A. Kaolin d'Eisenberg (chamotte thon), employé spécialement pour les objets d'ornement appelés en Allemagne *chamotte* et pour la fabrication des capsules. La couche a 20 m. d'épaisseur;

B. Kaolin de Weissenfels sous forme d'un grès kaolinique blanc grossier;

C. Kaolin de Martinrode, d'un blanc de neige.

KAOLIN DES EYZIES (Dordogne) ¹

Un certain nombre de fouilles et de carrières ont reconnu autrefois des gites de kaolin qui se trouvent à environ 5 km. de la station des Eyzies, près du village de Queylon (Dordogne). Nous ne connaissons ce gisement que par un rapport inédit de E. Fuchs (1885), où il était qualifié de produit geysérien éruptif. Ses notes et coupes s'interprètent beaucoup plus naturellement par un phénomène d'origine continentale, fluviale ou lacustre,

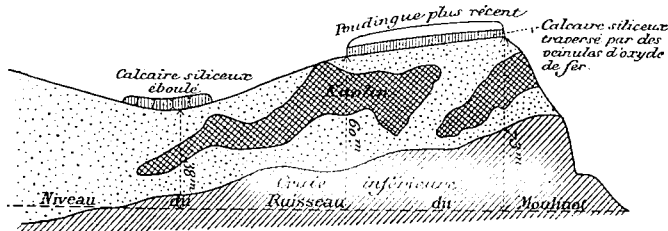


Fig. 127. — Coupe théorique du gîte de Queylon.

tre, à rapprocher de ceux qui ont produit, vers la même époque tertiaire, les phosphorites du Quercy, les fers en grains du Berry, les bauxites, etc.

Pratiquement, le remplissage des carrières est de nature irrégulière ; il se compose de kaolin compact, à cassure conchoïdale, souvent gras ou onctueux au toucher ; ces masses sont traversées par des filets plus ou moins épais d'argile blanche translucide analogue à l'halloysite. Très blanc et très fin, ce kaolin n'a presque pas de retrait et, pour cette raison, n'entre qu'en petites quantités dans les pâtes à porcelaine : il sert surtout à la fabrication des papiers et des savons. On le vendait environ 45 à 50 fr. la tonne.

Géologiquement, le kaolin des Eyzies se présente en grands amas irréguliers au milieu de sables micacés très fins, ordinairement ferrugineux, qui reposent eux-mêmes sur un calcaire infracrétacé, dont la surface est irrégulièrement ravinée et qui représentent une transgression tertiaire sur ce plateau de craie émergé. L'allure de ces sables est celle de dépôts fluviaux, où se seraient accumulées par paquets des substances hétérogènes.

Les coupes des carrières ² montrent, dans les amas et se fondant insensiblement avec eux, des filets continus voisins de la verticale, remplis

¹ Feuille au 1/80.000^e de Bergerac.

² Fig. 127 et 128.

d'une argile translucide gélatineuse : l'axe de ces filets étant jalonné, dans toute l'épaisseur du gîte, par des rognons de silex ou de meulière compacte translucide. Le remplissage du filet passe insensiblement au kaolin en s'éloignant de l'axe. D'autres fentes sont remplies de sable micacé ferrugineux.

Dans le sable, on rencontre çà et là des rognons de fer géodique. Sur ce sable est un banc de calcaire siliceux très dur, voisin de la meulière, où se manifeste la silicification ordinaire des plateaux de calcaire lacustre.

On retrouve une coupe analogue, mais sans kaolin, au plateau de *Born*, près *Sarlat* (fig. 129), où la meulière recouvre des sables micacés contenant d'énormes amas irréguliers d'ocres, d'argiles ferrugineuses et manganésifères.

A *Gavaudun*, dans le Lot-et-Garonne, on a trouvé, de même, des amas d'environ 50 m³ de kaolin blanc remplissant des poches analogues à celles des minerais de fer. Quelques traces d'acide stannique ont fait

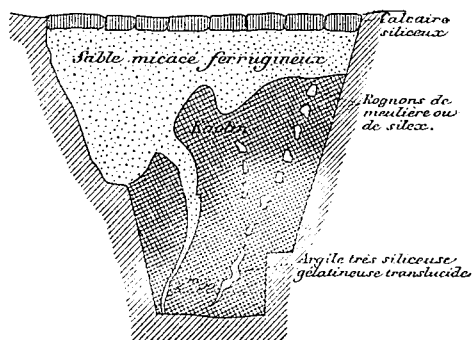


Fig. 128. — Coupe de la carrière la plus élevée sur le plateau de Queyran, d'après E. Fuchs.

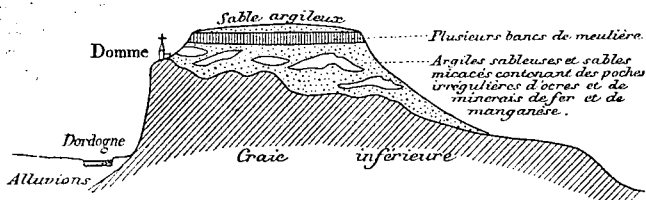


Fig. 129. — Coupe du plateau de Born, près Sarlat, d'après E. Fuchs.

supposer que ce kaolin provenait de la destruction d'une granulite stannifère.

Tout cet ensemble est à rapprocher des minerais de fer et de manganèse que l'on trouve dans les mêmes conditions un peu plus au Nord et plus près des roches cristallines du Plateau Central, à la base des sables du Périgord oligocènes (Excideuil¹), sur les calcaires jurassiques ou crétacés ravinés. L'importance des circulations d'eau souterraine en ce point est prouvée par le développement, au voisinage des Eyzies, de grottes célèbres par leurs richesses préhistoriques.

¹ Feuille au 1/80.000^e de Périgueux.

9° MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION SILICEUX ET SILICATÉS ¹

Les pierres de construction appartiennent à deux groupes principaux : pierres à base de silicates ou de silice et pierres calcaires. Nous nous contenterons ici de quelques mots sur les premières ².

Les pierres de construction employées dans une région sont généralement en relation directe avec la constitution géologique de ses environs, la pierre à bâtir étant une substance relativement trop commune pour supporter, à moins de qualités très spéciales, des frais de transport importants.

Dans les pays de roches anciennes, on choisira de préférence le granite gris ou la granulite (Limousin, Bretagne, Vosges, etc.)³. Sur place, le mètre cube de granite brut vaut de 30 à 80 fr. ; la taille des parties planes coûte 25 fr. le mètre carré ; à Paris, le granite pour monuments revient de 150 à 250 fr. A Aberdeen, des carrières fournissent 70 000 t. de granite par an. La région du Lac Majeur est également classique pour le travail du granite.

La granulite massive donne également souvent une belle taille et n'a pas, comme le porphyre par exemple, une dureté exagérée. Le gneiss un peu résistant a l'avantage de fournir facilement des surfaces planes parallèles, mais il est difficile à appareiller convenablement.

Dans les pays volcaniques, la lave est très appréciée malgré sa vilaine couleur ; les andésites de Volvic, près Clermont-Ferrand, sont exportées à de très grandes distances.

Les terrains paléozoïques sont généralement trop schisteux dans notre pays et surtout trop disloqués, pour donner, à l'exception de quelques marbres ou de certains grès ou quartzites, de bonne pierre de taille. En fait de grès et quartzites, nous nous contenterons de citer ceux du Roule près Cherbourg, etc.

Le houiller, le permien et le trias alimentent souvent d'importantes carrières de grès à ciment siliceux, gris ou jaune dans le houiller, rouge dans le permien, bariolé dans le trias (grès des Vosges à Strasbourg, etc.). Le grès houiller, utilisé dans la Loire et en Saône-et-Loire, vaut de 35 à 40 fr. sur la carrière ; il résiste à des charges de 200 à 250 kg. par centimètre carré ; le grès des Vosges, qui résiste à 300 et à 350 kg., vaut de 15 à 40 fr.

10° ARDOISES ⁴

Usages. — L'ardoise est un schiste argileux, ou phyllade, à grain fin et fissile ⁵, dont la couleur varie du gris violacé ou bleuâtre au gris rouge.

¹ 1894. *Norwegens Stein Industrie* (Z. f. pr. G., p. 210 et 1895, p. 114). — 1895. HERRMANN. *Die technische Verwerthung der Lausitzer Granite* (Z. f. pr. G., p. 433). — 1900. RIESE. *Clays and Shales of Michigan* (Geol. Surv. of Michigan, t. 8). — 1901. HANISCH et SCHMID. *Die Steinbrüche Oesterreichs, welche Quadern, Stufen, Pflastenteine, Schleif und Mühlsteine und Dachplatten liefern.* (Wien, Gräser a. C°).

² Voir au tome 2, page 165, une étude sur les pierres calcaires avec bibli.

³ Par exemple, le Maine-et-Loire extrait 5 000 t. de granite valant 80 000 fr.

⁴ Coll. Ec. d. M., 1846 à 1848. — DAVIES. *Traité de l'ardoise et de son expl.* (4 vol. in-12). — 1909. A. ANTISSEIER. *Etude sur l'ind. ardoisière en France* (Bul. Soc. Ind. Min., t. 44, p. 46-86 et 133-198).

⁵ On sait que la fissilité est souvent indépendante de la stratification.

Son inaltérabilité à l'air et à l'humidité l'a fait employer, depuis le x^e siècle environ, pour la couverture des édifices¹. On l'utilise, en outre, pour les carrelages et revêtements de salles de bains, de laiteries, pour la fabrication des mangeoires d'écuries, urinoirs, tablettes de cheminée, tables de billard, isolateurs électriques, etc., pour l'écriture ou le dessin.

La qualité d'une ardoise peut être très variable. Celle qui contient de la pyrite est altérable parce que ce sulfure s'oxyde à l'air et devient pulvérulent; celle dont la masse est poreuse s'imprègne de l'eau des pluies et la moindre gelée suffit pour la briser: elle a de plus l'inconvénient d'être perméable. Une bonne ardoise doit être dure, sonore, pesante, avoir une surface lisse, une structure homogène et serrée, une couleur foncée. On peut se rendre compte de la qualité, en immergeant la pierre verticalement dans l'eau, de manière qu'elle n'y plonge que jusqu'au tiers de sa hauteur. Si, au bout de vingt-quatre heures environ, l'extrémité supérieure est parfaitement sèche, l'ardoise sera jugée bonne et d'une compacité suffisante; dans le cas contraire, elle devra être rejetée, l'ascension de l'eau dans la masse en démontrant la porosité.

Statistique. — Le principal centre de production dans le monde est le Pays de Galles, qui produit pour 30 à 35 millions de francs par an (350 à 400 000 t.), avec tendance à la diminution très accentuée.

Puis vient la France avec 18 à 20 millions, dont 11 à 12 en Maine-et-Loire (7 à Angers). Le nombre des ouvriers y dépasse 9 000, dont 5 000 en Maine-et-Loire.

En 1907, la France a produit 663 millions d'ardoises pour toitures représentant 332 000 t. d'une valeur moyenne de 64 fr. et on a exporté, sur ce total, 64 000 t. On a extrait, en outre, 1 650 t. d'ardoises en tablettes à 153 fr. Cette production se répartissait entre: le Maine-et-Loire (Angers), 136 000 t.; les Ardennes, 43 000 t.; la Mayenne (Renazé et Chattemoux), 32 000 t.; la Corrèze (Alassac, Travassac, etc.), 21 000 t.; la Savoie, 14 700 t.; les Basses-Pyrénées, 9 000 t.; le Finistère (Châteaulin), le Morbihan et le Tarn, chacun 8 000 t.

En 1909, on a eu 306 000 t. valant 20 512 000 fr. Les principaux producteurs ont été:

TABLEAU 35. — PRODUCTION ARDOISIÈRE FRANÇAISE.

	Millions d'ardoises.	Mille tonnes.	Millions de francs.
Maine-et-Loire	461	144	11,7
Ardennes	150	38	3,1
Corrèze	40	20	0,9
Pyrénées	30	15	0,7
Savoie	24	17	0,5
Finistère	9	7	0,3
Aveyron	5	3	0,07
	719	244	17,3

¹ Suivant la force habituelle du vent dans le pays, on peut employer des ardoises plus ou moins grandes. Dans les points peu exposés au vent, on préfère souvent la dimension maxima, dite *grande anglaise*, qui coûte plus cher, mais est à peu près inusable.

Les Etats-Unis extraient pour environ 15 millions de francs d'ardoises. Les autres pays, Allemagne, Belgique, Suisse, Italie, interviennent pour très peu de chose. L'Italie, cependant, produit un peu d'ardoises (35 000 t. en 1908) dans le district de Carrare.

Géologie. — Les ardoises étant, comme l'a montré Daubrée expérimentalement, un produit du laminage des argiles, peuvent se rencontrer partout où des schistes ont subi un tel métamorphisme. De là vient leur gisement habituel dans les terrains primaires : cambrien de Fumay (Ardennes) et d'une partie du Pays de Galles; silurien d'Angers; carbonifère de Chateaulin (Finistère), etc. Mais il en existe également dans des étages beaucoup plus récents, à la condition d'aller les chercher dans les régions où ces étages ont été métamorphisés par les plissements, comme les Alpes (Savoie, Suisse, etc.).

Voici, dans une coupe géologique, la place de quelques gisements ardoisiers.

Dinantien		Ardoises de Chateaulin (Finistère).
Gothlandien . . .	Llandovery, Wenlock et Ludlow.	Ampélites de l'Anjou, ardoises du Shropshire.
Ordovicien	sup. Caradoc et Bala.	Grès de May.
	moy. Llandeilo.	Ardoises d'Angers; Festiniog (Pays de Galles).
	inf. Grès de May.	
Cambrien	sup. Postdamien.	Arthog (Pays de Galles).
	inf. Géorgien.	Ardennes, principales carrières du Pays de Galles (Penrhyn, Llanberis).
Précambrien . . .	—	Parennes (Sarthe), Saint-Germain-de-Coulamer et Chatemoux (Mayenne) Alassac, Travassac (Corrèze), phylades de Saint-Lô.

ARDOISES DES ARDENNES¹

Dans les Ardennes, l'extraction de l'ardoise se fait dans trois centres principaux, qui sont, par ordre d'importance : 1° Fumay et Haybes; 2° Rimogne et Harcy; 3° Deville et Monthermé. Le niveau ardoisier appartient à l'étage de base du cambrien, dit par Gosselet devillo-revinien (géorgien), au-dessus duquel viennent les schistes noirs pyritifères de Revin.

Les ardoises violettes de Fumay présentent des taches vertes, que Gosselet a expliquées par une altération superficielle. Il entre, dans leur composition, 1,30 p. 100 d'acide titanique. Celles de Deville et de Rimogne ont des cristaux de magnétite couchés obliquement sur le plan des feuilletés et tous orientés dans le même sens.

Les ardoises obtenues sont, en moyenne, plus dures et plus solides que celles d'Angers; elles durent de quatre-vingt-dix à cent ans, tandis que celles-ci ne durent que vingt à trente. En revanche, elles ont le grain

¹ NIVORT. *L'industrie des Ardennes.* — 1881-82. LAHOUSSEY. *Note sur le terrain ardoisier de Rimogne* (Ann. de la Soc. géol. du Nord, t. 9, p. 28). — 1882-83. GOSSELET. *Com. sur les veines ardoisières de Fumay* (B. S. G. F., 3^e série, t. 11, p. 343). — 1889. GOSSELET. *L'Ardenne*, p. 33 à 76, 297, 307 et carté au 1/40.000^e des ardoisières de Fumay, pl. 2. — 1902. WATRIN. *Ardoisières des Ardennes* (Soc. Ind. Min. C. R. mensuel, p. 99-102).

moins fin et forment des couches très tourmentées, à replis nombreux. L'exploitation est souterraine.

A *Fumay*, on connaît huit couches dirigées en moyenne E.-W., à partir de la Meuse, à l'Est. Le banc principal, exploité par les carrières de Moulin-Sainte-Anne, Bellerose, Liémery, etc., sur les deux rives de la Meuse, présente une épaisseur qui n'atteint pas 8 m. et se divise en un certain nombre de couches non adhérentes et séparées les unes des autres, soit par une veinule de grès de quelques centimètres, soit par un lit d'argile presque imperceptible. L'inclinaison de ce banc n'est que de 25° à 30° sur l'horizontale : ce qui force à laisser des massifs de réserve pour soutenir le toit. L'ardoise produite est de couleur lie de vin; elle contient parfois de petits cristaux octaédriques de fer oxydulé.

A *Rimogne* (carrières de Pierka, Truffy, la Grand^e Fosse), la couche principale atteint 50 m. de puissance vers l'Ouest, mais se réduit à zéro du côté de l'Est. On exploite deux espèces d'ardoises, les bleues et les vertes.

A *Deville* et *Monthermé*, les couches n'ont en général que 4 à 5 m. de puissance et plongent d'environ 50°.

L'exploitation des Ardennes consiste en un défilage par tranches avec piliers abandonnés. La Société du Moulin-Sainte-Anne occupe 350 ouvriers, dont moitié au fond. Au jour, le travail se fait, soit à la main, soit mécaniquement. Dans le travail à la main, un premier ouvrier refend l'ardoise, suivant la stratification, en blocs de 0,10 m. d'épaisseur et les recoupe perpendiculairement à la stratification, puis refend au ciseau pour obtenir l'épaisseur définitive de 2,5 mm. à 4 mm. Un autre ouvrier taille l'ardoise suivant un gabarit en l'appuyant sur un support. Dans le travail à la mécanique, on découpe le côté du bas à la scie circulaire et les autres côtés à l'emporte-pièce actionné par une griffe.

ARDOISES D'ANGERS¹

Géologie. — Les schistes ardoisiers d'Angers font partie d'un ensemble schisteux considérable appartenant à la formation silurienne (ordovicien). Ces schistes, qui se poursuivent sur une grande étendue de l'Est à l'Ouest, ont leur limite Est aux environs d'Angers; dans le sens Nord-Sud, ils présentent des plissements importants; les couches y sont, par places, fortement redressées et les mêmes bancs affleurent certainement à plusieurs reprises. Le niveau exploité est supérieur aux schistes à minerais de fer, que nous décrivons plus tard et qui eux-mêmes reposent sur le grès armoricain. Il est recouvert par l'étage des grès de May (ordovicien supérieur).

Les schistes ardoisiers, qui ont participé au mouvement général des

¹ 1863. BLAVIER. *Sur l'industrie ardoisière d'Angers*. — 1879. MAUMENÉ. *Sur la composition de l'ardoise* (C. R., t. 89, p. 243). — 1880. BLAVIER. *Sur l'éclairage des ardoisières* (Ann. d. M., 1^{er} liv.). — 1883. BLUMARD. *Les carrières d'ardoise à Angers* (La Nature, n° 525-544, p. 430). — 1888. BLAVIER. *Sur la résist. du schiste ardoisier d'Angers*. — 1891. ICHON. *Sur l'expl. sout. des ard. d'Angers* (Bull. Soc. Ind. Min., 3^e série, t. 4). — 1894. ARDOUIN. *DUMAZET. Voyage en France* (2^e sér., p. 174 à 195. Berger-Levrault). — 1900. BENOIT. *Etude sur les ard. de l'Anjou* (1 vol. Dunod). — 1900. KARSTEN. *Note sur les Ard. d'Angers* (Rev. univ., t. 32, p. 250-257). — 1903. G. LARIVIÈRE. *Ind. ard. de Maine-et-Loire* (74 p. in-4^o et carte). — 1904. L. DE LAUNAY (La Nature, n° 1103, 21 juillet) — 1909. AUTISSIER. *Et. sur l'ind. ard. en France* (Bul. Soc. Ind. min., 4^e s., t. 11, p. 13 et 133).

terrains, forment, au milieu des autres schistes, plusieurs couches appelées *veines* dans le pays, de puissance variable, mais généralement assez considérable et dépassant, par endroits, cent mètres. Il va de soi que, sur une pareille épaisseur, la qualité du schiste n'est pas toujours la même, l'ardoise est plus ou moins fissile et, aux environs d'Angers, on donne le nom de veine spécialement à certaines parties de meilleure qualité. Une particularité qui distingue les ardoises d'Angers de celles des Ardennes, c'est l'absence presque absolue de bancs de grès intercalés.

Aux environs immédiats d'Angers, les principaux centres d'exploitation sont actuellement à Trélazé et Saint-Barthélemy. En allant de l'Est vers l'Ouest, la largeur de la bande de schiste se réduit de 1 000 m. environ près de Trélazé, à 600 m. près de l'ardoisière des Fresnais, et diminue encore vers l'Ouest. Tandis qu'à Trélazé il y a six veines (dont deux seulement exploitables avantageusement), aux Fresnais, on a trouvé trois veines parfaitement caractérisées.

Le passage du schiste non fissile à l'ardoise est généralement graduel ; près de Trélazé, la veine du Sud, qui a un pendage Sud de 20° sur la verticale, est limitée au Nord par la *liche*, c'est-à-dire par un schiste coupé de petits joints transversaux doux au toucher. Dans l'intérieur de la veine proprement dite, qui a de 35 à 60 m., il y a des variations constantes en direction comme inclinaison ¹.

A leurs affleurements, les ardoises sont recouvertes, sur 15 à 20 m. de profondeur, par une partie décomposée qu'on appelle la *cosse* et qu'il faut commencer par déblayer quand on veut exploiter à ciel ouvert. Plus on enfonce, plus les ardoises gagnent en solidité.

Les bancs ardoisiers sont découpés : d'une part suivant le plan de fissilité, de l'autre, suivant les horizontales de ce plan (*fil de la pierre*). Il existe, en outre, de nombreux accidents, tels que : les *torsins*, larges fentes presque verticales remplies de rognons de quartz enveloppés dans des fragments tordus et plissés des roches encaissantes ; les *cordes de chat*, veines de quartz blanc suivant les directions de la veine ; les *chefs* (cassures suivant la verticale) ; les *bavures*, les *erusses*, etc... Tous ces accidents jouent un rôle dans le travail.

Exploitation. — Les ardoisières d'Angers ont été, depuis le XII^e siècle, exploitées à ciel ouvert ; ce n'est qu'en 1832 qu'on a commencé une première exploitation souterraine aux Grands-Carreux en pratiquant de grands vides qui avaient jusqu'à 60 m. en long et en large à la voûte sur 100 m. de profondeur. Ces vides ont été, depuis 1878, éclairés à la lumière électrique aux Fresnais, aux Grands-Carreux, à l'Hermitage ; puis, peu à peu, dans la plupart des ardoisières. La résistance très grande du schiste avait permis, en organisant une surveillance assidue des voûtes au moyen de *ponts* volants suspendus par les tringles de fer, d'éviter les accidents par éboulement du toit.

Plus tard, vers 1890, on a organisé, notamment à la Grand'Maison (Trélazé) et à la Forêt, près Segré, la méthode dite en remontant, avec remblayage par tranches, qui s'est aujourd'hui généralisée. On admet

¹ Ces variations peuvent modifier le prix de la substance dans une proportion considérable.

que la production par ouvrier d'à bas est d'environ 1,66 m³; ce qui représente 2,75 fr. d'abatage par mètre cube, non compris le remblai des matériaux, etc. Le prix de revient par mètre cube utile donnant 2300 ardoises est estimé, dès lors, à 17,40 fr.

Une fois au jour, « à l'à haut », le bloc est *répartonné* en dalles épaisses, puis clivé en *fendis*, et découpé avec un couteau dit *doleau*; ou, maintenant, il est débité à la machine à tailler. On cherche à augmenter la dimension des ardoises (grandes anglaises) pour lutter contre la concurrence des tuiles mécaniques.

Les environs d'Angers ont fourni longtemps de 75 à 80 millions d'ardoises par an; ils dépassent aujourd'hui 400 millions. Le prix de vente, qui était descendu de 30 fr. le mille à moins de 20 francs vers 1893, est remonté à 40.

Les principales exploitations, sont: avant tout, celles de Trélazé, et, accessoirement, celles de la Pouéze, qui exploitent une même veine (Commission des ardoisières d'Angers); puis celles de la Forêt (à Combrée, près Segré) et de Misengrain (Noyant-la-Gravoyère) sur une autre.

ARDOISES DU PAYS DE GALLES ¹

On exploite, dans le Shropshire, le Flintshire, le Denbigshire, le Carnarvonshire, le Merionetshire et le Montgomeryshire, des ardoises appartenant aux terrains cambriens et siluriens. Ces divers terrains forment des zones dirigées N.E.-S.W. et, si on les parcourt de l'Ouest à l'Est, on rencontre une série de veines d'ardoises, dont chacune donne lieu à des exploitations ².

Les ardoisières du pays de Galles, avec leurs 35 000 000 fr. de production annuelle, se classent à la tête de cette industrie dans le monde.

Sur la première zone à l'Ouest, située dans le cambrien inférieur, on a, au même niveau que les ardoises des Ardennes, les carrières de Penrhyn (Bethesda): 2 800 ouvriers; de Dinowic (Llanberis): 2 757 ouvriers.

Sur la ligne n° 2, dans les *lingula flags* (Postdamien ou cambrien supérieur), une seule ardoisière, celle d'Arthog, a donné de bons résultats.

Au contraire, dans le silurien, particulièrement dans l'assise de Llandeilo (ordovicien moyen) traversée par des filons-couches de *greenstone*, on a les ardoisières de Palmerston et de Llechwedd (Blaenau), de Cwm Orthin (Than y Grisiau), etc., dans le district de Festiniog, qui occupent chacune environ 500 ouvriers. Les ardoises sont gris bleu et très analogues à celles d'Angers, qui appartiennent au même niveau.

Enfin, dans les couches gothlandiennes de Wenlock en Shropshire, on extrait, par an, environ 20 000 t.

L'exploitation se fait, tantôt à ciel ouvert, tantôt souterrainement: par gradins inclinés avec piliers abandonnés à Festiniog; par tranches horizontales avec piliers abandonnés à Corris; par gradins renversés, avec ou sans piliers abandonnés, à Cwm Croesor près de Tan y Bulch.

1878. DAVIES. *A treatise on Slate and Slate quarrying*. — 1881. HICKS. *Geol. magazine* (Q. J. of the g. Soc. of London). — 1883. HUNT (Robert). *Mineral statistics of the United Kingdom*. — 1884. LARIVIÈRE. *Voyage aux ardoisières du pays de Galles* (An. d. M., 8^e série, t. 6, p. 505).

² Voir, t. 1. p. 663. fig. 98, une carte représentant une partie de cette région.

La production annuelle du North Wales en ardoises manufacturées était estimée : en 1878, à 700 000 t. ; en 1886, à 500 000 t. ; en 1899, à 478 000 t. valant 38 millions de francs. Elle est tombée, en 1910, à 315 300 t. dont 222 300 t. à ciel ouvert et 93 000 t. souterrainement. Le nombre actuel des ouvriers est de 14 950, dont 3 270 souterrainement, 11 680 à ciel ouvert. Ce nombre était de 15 988 en 1899.

Les chiffres suivants, déjà un peu anciens, donnent l'ordre de grandeur des exploitations.

Penrhyn quarry et environs (cambrien inf.)	135 000 tonnes.	3 500 ouvriers.
Llanberis (cambrien inf.)	125 000 —	3 500 —
Festiniog (ordovicien moyen)	140 000 —	4 000 —
Nantle	45 000 —	1 500 —
Corris	35 000 —	1 200 —
Llangollen et prolongement.	20 000 —	800 —
	<hr/>	<hr/>
	500 000 tonnes.	14 500 ouvriers.

En supposant que le rendement total moyen de schistes exploités ne soit guère que de 1/15, on voit que la production ci-dessus nécessite, chaque année, l'extraction de 2 500 000 m³ de schistes (7 500 000 t.).

Le prix de revient approximatif de la tonne de schiste extraite et transformée en ardoises peut s'estimer à 28 ou 29 fr. En ajoutant les frais généraux, travaux préparatoires, etc., on arrive à 56 ou 58 fr.

La production est écoulée surtout par mer : partie en Angleterre ; partie à l'exportation, principalement en Allemagne et en Amérique.

11° MICA¹

Usages. — Le mica industriel ne prend de valeur que quand on peut l'obtenir en grandes feuilles blanches et transparentes. Ses emplois sont alors beaucoup plus nombreux et importants qu'on ne le croirait d'abord : emplois fondés sur la facilité de son clivage, sa flexibilité, sa transparence, son inaltérabilité au feu et à l'eau, son peu de conductibilité. On en fait des plaques réfractaires pour le devant des poêles mobiles et pour les regards des fours métallurgiques. L'électricité utilise, comme isolants, des bandes de 12 cm. de long sur 25 mm. de large qui doivent être flexibles et non conductrices. On en confectionne des lanternes, des lustres, des fumivores, des écrans, des instruments de physique appelés colorigrades, des images religieuses, etc. On a également essayé autrefois de s'en servir (particulièrement en Russie, d'où son nom de verre de Moscou) pour faire des vitrages de navire, résistant par leur flexibilité aux vibrations des décharges d'artillerie.

Les déchets de cette industrie des grands micas trouvent encore quelques emplois sous la forme de mica lamelliforme pulvérulent et ressemblant à de la poudre d'or et d'argent pour faire des papiers de tentures satinés ou argentés, de la poudre à sécher l'encre, etc. Il faut, pour cela, les réduire en poudre par une opération assez délicate. On s'est égale-

¹ 1893. WILLIAM ALLEN SMITH (Stat. de l'Engineering. p. 339). — 1893. (La Nature, 24 avril, p. 171). — 1909. L. DE LAUNAY. *L'industrie du mica dans l'Inde* (La Nature, 17 juil., n° 1886 et *Rich. min. de l'Asie*, p. 118, 713, 770). — *Min. Ind. for 1910*, p. 478.

ment aperçu, depuis 1898, dans l'Inde, que l'on pouvait utiliser ces déchets pour les agglutiner et les mouler, en feuilles de « mica » remplaçant le mica naturel dans divers cas.

Statistique. — Les principaux pays producteurs de mica dans le monde sont : d'abord, l'Inde qui fournit environ 60 p. 100 de la consommation mondiale (en moyenne, 4 300 000 fr. par an) ; puis le Canada, qui en produit 20 p. 100, presque totalement exportés aux États-Unis et les États-Unis eux-mêmes (Carolines, South Dakota), dont la production se rapproche de celle du Canada. Nous allons revenir sur la description de ces gisements. Après quoi viennent la République Argentine, le Brésil¹, l'Australie, et, très accessoirement, la Norvège.

En 1902, la valeur extraite était de 2 189 000 fr. dans l'Inde contre 2 054 000 au Canada et 594 000 aux États-Unis. Depuis ce moment, la production du Canada est tombée peu à peu à 700 000 fr., tandis que celle des États-Unis s'est élevée à 1 500 000 fr.

Aux *Indes*, il y a eu des fluctuations, tant dans l'exploitation que dans la production, qui sont loin d'être équivalentes. Les exportations de ce pays ont monté de 185 t. en 1894 à 1 130 t. en 1900, pour redescendre à 1 020 t. en 1903 et 962 t. en 1904. En 1905, il y a eu un essor considérable ; on a exporté 6 650 t. valant, d'après les documents officiels, 3 550 000 fr. De 1906 à 1908, la production indoue s'est tenue vers 2 600 t. ; elle a été de 5 600 t. en 1909. Ces exportations des Indes partent, pour les trois quarts, à destination de l'Angleterre et des États-Unis, où la principale application est l'électricité, comme isolant pour les hauts voltages. Mais on utilise également une certaine quantité de mica dans l'Inde : les grandes feuilles pour faire des portraits enluminés qui échappent aux altérations par l'humidité, la chaleur, les ravages des insectes, etc., ou encore pour fleurs artificielles et les micas de qualité inférieure pour divers usages accessoires.

Dans l'Inde, le Bengale fournit la moitié de la production : 700 t. en 1905, 1 900 t. en 1908, 1 100 t. en 1909 valant 2 000 fr. la t. Puis vient Madras (300 t. en 1902, 450 t. en 1909) ; enfin, le Rajputana (90 t. en 1909). Mais les carrières mal exploitées s'épuisent vite. Dans le *Bengale*, on n'extrait plus que du mica de qualité secondaire valant au plus 1 600 fr. la tonne. A Hazaribagh (Chota Nagpur), principal centre de ce district, on en a extrait 500 t. en 1907. Enfin, dans le Rajputana, il existe une petite mine à Ajmer. Le Mysore et Ceylan renferment également des gisements inutilisés.

Le nombre des ouvriers employés à ces mines des Indes a été de 9 à 10 000 dans ces dernières années.

Au *Canada*, les travaux sont concentrés dans le district d'Ottawa (Villeneuve, etc.) On produisait, en 1889, 16 à 17 t. de mica. En 1907, le Canada a produit 775 t. valant 1 500 000 fr. En 1910, la production a été moitié moindre (700 000 fr.).

Aux *États-Unis*, on produit environ 1 200 t. de mica en feuilles dans les

¹ Cf. 1899. A.-M. SMITH. *Extraction du mica au Brésil* (Engineering, p. 293 et 294 ; Cf. Z. f. pr. G., 1899, 226).

Carolines, le South Dakota, le New Hampshire (Comté de Grafton). En 1890, en n'extrait que 27 t. ; en 1899, 50 t.

En *Norvège*, dans l'île de Quen, on a exploité, dans des pegmatites, des micas atteignant plus d'un mètre de diamètre avec du quartz laiteux utilisé dans les verreries et du feldspath pour les faïenceries.

Au *Transvaal*, on a organisé, en 1910, une exploitation occupant 200 hommes à Leydsdorp.

En *France*, on ne rencontre guère de mica ayant plus de quelques centimètres (Haute-Vienne, Corrèze, etc.).

Gisements. — Les beaux gisements de mica blanc muscovite sont toujours dans des quartz associés aux granulites ou dans les granulites même, et sont, en général, intéressants pour la grande variété de minéraux qu'on trouve associés.

Mica de l'Inde¹. — Le principal centre d'exploitation du mica dans le Bengale est situé dans les districts d'Hazaribagh et Gaya entre 85 et 86 degrés de longitude, et 24 à 25 degrés de latitude.

On a là un massif de gneiss, micaschistes, amphibolites et quartzites de direction E.-W, avec pendage Nord, que traversent de nombreux filons de pegmatite ayant une tendance à s'interstratifier. La présence des pegmatites paraît en relation avec le phénomène intrusif qui a transformé des sédiments en gneiss. On a cru remarquer un certain rapport entre la composition des filonnets et celle des roches encaissantes : développement du quartz dans les quartzites, de l'orthose dans les gneiss feldspathiques, du mica dans les micaschistes. Cette relation, bien problématique, n'est pourtant pas impossible, étant données les substitutions qui ont dû contribuer à faire entrer dans la composition de la pegmatite les éléments du terrain qu'elle traverse. La tourmaline, la cassitérite et la columbite apparaissent comme éléments accessoires, naturels à prévoir dans ce genre de roches. On trouve, en outre, assez fréquemment de la fluorine, de l'apatite, de la triplite, de la tourmaline et les autres satellites ordinaires des granulites, tels que la pechblende. Les micas sont surtout de la muscovite, accessoirement de la biotite et du lépidolithe.

On peut étudier, à ce propos, les conditions générales, dans lesquelles se présentent les gisements de mica industriel. Ces conditions sont assez rarement réalisées ; car il faut d'abord rencontrer les grosses veines de pegmatite (quartz et feldspath) à mica, qui ne se développent guère que dans les micaschistes. Il faut, en outre, que la région n'ait pas subi les mouvements de dislocation, si fréquents précisément dans ces massifs primitifs : dislocations, par lesquelles a été d'ordinaire brisée cette substance fragile, dont la valeur tient uniquement aux grandes dimensions des cristaux. Peu de régions, dans les terrains archéens, répondent à un programme semblable.

Les intrusions pegmatiteuses avec mica ont suivi les interstices des feuillets schisteux en prenant naturellement un développement particu-

¹ 1902. TH.-H. HOLLAND. *The mica deposits of India* (Mem. India, t. 34, part. 2; 122 p. et 9 pl., avec bibliog., p. 112 à 114). — 1905. HOLLAND. *Mineral prod. 1898-1903* (Rec. India, 32, p. 63 à 69). — 1909. L. DE LAUNAY. *L'industrie du mica dans l'Inde* (La Nature, 17 juillet, n° 1886). — *Rich. Min. de l'Asie*, p. 713.

lier là où il y avait plissement, ou encore rencontre d'une cassure transversale : fait expérimental, dont les mineurs indous tiennent grand compte dans leurs recherches. Mais, parfois aussi, des noyaux de pegmatite semblent s'intercaler dans les feuillets sans qu'il y ait courbure de ceux-ci au voisinage, comme s'ils s'étaient substitués à eux.

Exploitation. — L'exploitation a lieu à ciel ouvert par carrières d'une centaine de mètres, exploitées de la manière la plus primitive, en suivant les veines altérées de pegmatites, dans lesquelles le mica se trouve tout séparé de sa gangue. On fait un triage d'après la couleur, la transparence et la taille. Puis on clive les blocs. Enfin on coupe les feuilles : tantôt en morceaux de forme irrégulière, tantôt en rectangles, suivant les conditions du marché, les droits de douane applicables au produit brut ou fini, la demande de menus fragments et déchets. Ce coupage s'opère, soit avec des ciseaux proprement dits à deux branches, soit avec des cisailles montées sur un bâti. Enfin les caisses de mica sont expédiées à Calcutta et, de là, en Europe.

Prix. — Pour la même qualité, le prix varie beaucoup suivant la dimension : mica spécial au delà de 36 pouces carrés (le pouce carré de 0,000645 m²) ; mica n° 1 de 24 à 36 ; n° 2 de 15 à 24, etc... ; n° 5 de 3 à 6. Par exemple, du mica spécial de qualité secondaire valant de 9 à 10 fr. le kg., le n° 1 vaudra 7 à 9 fr. ; le n° 5 seulement 0,45 fr. à 0,50 fr. Aux Etats-Unis, en 1900, le mica en feuilles importé valait 7 fr. le kg., le mica en débris 40 à 50 fr. la t. En 1910, le total de 886 t. importées était compté en moyenne 4 fr. le kg. Le marché étant très étroit, ce prix subit, d'une année à l'autre, des fluctuations très fortes.

Mica du Canada. — Au Canada, les gisements se trouvent dans l'Est de l'Ontario et dans la partie voisine de la province de Québec, au Nord de la rivière Ottawa, dans les vallées des rivières Gatineau et du Lièvre. La muscovite se trouve exclusivement dans des pegmatites. On cite la mine de Villeneuve (Ottawa) à 30 km. N. de Buckingham, appartenant à la Compagnie « the British and Canadian mica and mining Co », dont les premiers travaux datent de septembre 1884.

On y rencontre des cristaux de 0,75 m. de côté. On en a même extrait un qui pesait 140 kg. et qui a produit pour près de 12 000 fr. de mica marchand.

Le mica se trouve en cristaux dans un filon pegmatoïde variant de 1 à 100 m. de largeur et de direction Nord-Est. Au mica sont associés du quartz, du feldspath blanc, de la tourmaline noire, du grenat et d'autres minéraux rares, entre autres des minéraux d'uranium et de cérium (monazite, samarskite, etc...) La mine contient aussi du kaolin très blanc. La roche est assez dure et on doit prendre des précautions spéciales de crainte de briser le mica.

D'autres gisements inexploités de la même région méritent une mention pour leurs associations minéralogiques, tels que la *Mine Leduc* (Ottawa, Wakefield) également sur une pegmatite, avec quartz, feldspath vert et tourmaline diversement colorée ; *Chicoutimi-Jonquière* : quartz blanc avec

¹ 1886. OBALSKI. *Rapport sur la province de Québec.* — 1907. *La Nature*, 9 févr., n° 1739 ; suppl.) — 1910. *Ress. min. du Canada*, p. 109.

émeraude et molybdénite ; *Maisonnewe* (Comté de Berthier) : quartz avec émeraude, grenat, samarskite, etc.

Au Canada, le mica blanc vaut en moyenne 2000 fr. la t. Les gisements sont très irréguliers ; mais on y trouve souvent, comme produits accessoires, des terres rares, dont le gisement normal est dans les mêmes pegmatites qui produisent ce mica : du tantale, du thorium, de la clévéite, qui contient plus de 70 p. 100 d'uranium et qui renferme, en outre, une quantité remarquable de radium.

12° AMIANTE OU ASBESTE ¹

Usages. — Il existe deux variétés d'amiante : l'une qui est de la trémolite (amphibole) flexible et blanche, l'autre du chrysotile². Cette dernière, dont les fibres sont plus longues et plus élastiques, est préférable pour les étoffes et cordes incombustibles. La variété trémolite est beaucoup plus abondante, mais de peu d'emploi.

L'amiante, qui servait dans l'antiquité à faire des mèches de lampes sacrées et une toile destinée à envelopper les corps livrés au bûcher, a encore aujourd'hui un certain nombre d'usages fondés sur son infusibilité et son inaltérabilité : usages, dont quelques-uns se sont même fortement développés depuis une dizaine d'années.

Sa résistance au feu le fait employer pour rideaux de théâtre, gants et vêtements de pompiers ou d'électriciens, cloisons, planches, tuiles, plaques, bardeaux (confectionnés en un mélange d'asbeste et de ciment portland).

On l'utilise en grandes quantités pour les joints de machines³ (au lieu d'étoupe et de minium), pour les fermetures de canons, pour l'isolement des tuyaux de vapeur. Les laboratoires s'en servent pour filtrer des liqueurs trop acides ; les chirurgiens en ont fait parfois une sorte de charpie purifiable au feu et à l'alcool. On tend également à l'adopter pour remplacer la gutta-percha comme isolateur des fils électriques, celle-ci n'empêchant pas toujours le feu de se communiquer, et l'ozocérite, qu'on avait essayé de lui substituer, ayant des inconvénients analogues⁴.

¹ Coll. Ecole des Mines, 1844 et 1845. — OBALSKI. *Rapports annuels sur le Canada*. — 1877-78. DE KONINCK. *Asbeste d'Ottre* (Ann. de la S. G. de Belgique, t. 83). — 1887. Ann. d. M., p. 149. — 1889. Eug. LUSCHIN RITTER. *Asbest ; dessen Vorkommen und Verarbeitung in Ebengruh* (Oesterreich-Ungarn) (B. u. H. J., t. 37, p. 87). — 1890. La Nature (13 déc.). — 1893. DONALD et KLEIN. *Asbestos in Canada* (Stat. de l'Engineering). — 1895. PAULA OLIVEIRA. *Asbeste au Brésil* (C. R. Z. f. pr. G., p. 140). — 1899. *Uralit, ein künstliches Baumaterial aus Asbest* (Z. f. pr. G., p. 189). — 1901. RÖLL. *Der Asbest und seine Bedeutung* (Gelstemünde. Henke, 11 p.). — 1901. *Die Lage des Asbest Marktes* (Z. f. pr. G., p. 247). — 1902. CHR. TARNUZZER. *Die Asbestlager der Alp. Quadrata bei Poschiavo* (Graubünden) (Z. f. pr. G., p. 217). — 1902. MÖLLMANN. *Der Asbest mit besond. Berück. der Canad. Asbest Ind.* (Berg. u. H. Ztg., p. 345 à 348). — 1907 à 1910. *The mineral industry* (1907, p. 71, 1908).

² Minéralogiquement, on devrait réserver le nom d'asbeste (ἀσβέστος, inextinguible) ou d'amiante (ἀμύζαντος, incorruptible) à la trémolite. Mais, dans l'industrie, on appelle de même les chrysotiles.

³ Aux environs de Laval (Mayenne), une usine importante travaille l'amiante du Canada. Une autre société s'est organisée à Tarascon en 1895.

⁴ (Ann. d. M., 1887, p. 149). Voir plus haut, t. 1, p. 596.

Les qualités supérieures à longucs fibres peuvent être manufacturées en fils et cordes, vêtements, papier et carton d'amiante.

Statistique. — La demande de l'amiante s'accroît d'année en année. La majeure partie de ce corps vient, depuis longtemps, du *Canada* qui, de 900 t. en 1882, est monté à 3 500 t. en 1886 ; 8 880 en 1890 ; 21 600 en 1898 ; 62 000 en 1907, plus 28 500 t. d'asbestic¹ ; 75 678 t. en 1910.

Le prix moyen de l'amiante du Canada, qui est un chrysotile fin et soyeux, très recherché sur les marchés anglais et américains, était, en 1889, de 500 fr. la t. ; en 1890, il a monté à 1 000 ou 1 200 fr. En 1892, il valait environ 700 fr. ; en 1907, 200 fr. Ces prix varient beaucoup suivant la qualité et la longueur des fibres.

En 1910, on a coté : la 1^{re} crue, 1 500 fr. la tonne ; la 2^e crue, 650 fr. ; la fibre 1^{re}, 250 à 500 ; la fibre 2^e, 100 à 150 ; la fibre 3^e, 50 à 60 ; l'asbestic, 5 à 10 fr.

L'*Oural* est devenu un producteur important depuis quelques années, surtout à 30 ou 40 km. Nord de Bazhenoff (100 km. S.-E. d'Iékaterinenburg). De 5 625 t. en 1907, on a monté à 15 553 t. en 1911. Les deux tiers sont fournis par la maison Poklievsky-Kozell et le Baron Girard de Soucanton ; puis viennent Koriévo et la C^{ie} Russo-Italienne. On a également commencé des travaux en Sibérie sur un affluent de l'Abakan, dans le district de Krasnoïarsk.

Aux *Etats-Unis*, la Californie produisait, en 1890, 30 t. d'amiante à 300 fr. On importait, cette même année, pour 1 300 000 fr. d'amiante canadien.

En 1907, on est monté à 2 000 t., comptées sur la mine à 80 fr. la t. et on a importé pour environ 7 000 000 fr.

Dans l'*Afrique du Sud*, le district de Carolina, près Machadadorp, entre Delagoa bay et Pretoria, a commencé, en 1907, à produire environ 150 t. Le Griqualand West, près du fleuve Orange, présente de l'amiante fibreux, remarquable par sa résistance, mais trop ferrugineux et s'altérant au feu. La Rhodesia paraît offrir un champ d'exploitation très favorable.

En *Italie*, la Valteline et le Val d'Aoste produisaient : en 1890, 126 t. d'amiante à 380 fr. la t. ; en 1910, 159 t. à 560 fr.

A *Chypre* (Monts Troodes), on a commencé à extraire de l'amiante en 1908. On connaît d'autres gisements dans l'*Inde*, les *Philippines*, l'*Oural*, l'*Altai*, etc.

Gisements du Canada². — L'amiante du Canada se trouve dans la Beauce et le Mégantic (province de Québec), où il est enchâssé dans la serpentine. Les principales mines sont dans les districts de Thetford, Black Lake, Danville, Coleraine, Templeton et East Broughton. On le rencontre dans deux variétés de serpentine que l'on croit être d'époques différentes. Le type de Thetford, plus long et plus fort, se trouve en veines, avec du fer chromé. Le type de Broughton forme des fibres parallèles aux plans de clivage des roches. Il s'extrait plus économiquement, mais, étant plus court, a moins de valeur. De la stéatite s'y associe.

La serpentine de Thetford dérive d'un amas de péridotite. Plus elle est

¹ Ce produit, d'une valeur insignifiante, n'est que de la serpentine broyée.

² 1910. G.-A. YOUNG. *Esq. geol. sur les Res. minér. du Canada* (Ottawa, p. 58). — 1911. *Report on the geology a. min. Res. of the Chibougamau region* (Quebec) p. 182 avec fig. — 1914. *Rapport sur les opérations minières dans la province de Québec en 1910*, p. 16. — *Le Canada et la France, 1886-1911*, p. 86.

exclusivement composée d'olivine et plus sa forme altérée est tendre, plus on a de chances d'y trouver de l'amiante. L'injection de granite dans la serpentine paraît avoir joué un rôle.

Dans le district de Black Lake, l'American Asbestos Co a un atelier de préparation actionné électriquement, qui passe environ 300 t. de roche par jour pour donner 200 t. de fibre préparée. D'autres ateliers semblables, destinés à séparer mécaniquement l'amiante de sa gangue, existent à East Broughton, Coleraine, etc.

Après broyage, on sépare les fibres ayant au moins 0,01 m. de long de celles qui sont plus courtes. On débarrasse sommairement l'amiante de sa gangue ; on le sèche ; on le fait passer sous des rouleaux écraseurs ; on l'introduit dans un cylindre muni de couteaux attachés à un axe central ; enfin les fibres sont classées automatiquement. En 1910, on a extrait 2 MT de roches, dont le quart a été immédiatement rejeté, pour obtenir finalement 100 000 t. de produits marchands.

Val Tremola. — La variété trémolite se trouve en particulier dans le Val Tremola (massif du Saint-Gothard), d'où la trémolite tire son nom. Elle constitue l'amiante dit d'Italie. Les amphibolites des micaschistes en contiennent assez fréquemment.

13° SILICATES EMPLOYÉS DANS LA BIJOUTERIE ET LA DÉCORATION ¹

Le nombre des minéraux employés dans la bijouterie et la décoration s'est beaucoup augmenté dans ces dernières années. La plupart d'entre eux sont des silicates et leur étude complète est à chercher dans les traités de minéralogie. Nous nous bornerons ici à quelques indications sur leurs gisements et sur leur commerce. Nous rappelons qu'il a été question précédemment du diamant², de l'apatite et de la turquoise, des cristaux de roche, améthyste et opale, des pierres de lune, microcline, etc.³. Le rutile et le sphène seront étudiés avec le titane⁴, les zircons avec le zirconium⁵ ; les corindons, rubis, saphirs et spinelles avec les composés de l'aluminium⁶ ; les malachites avec le cuivre⁷, etc.

¹ 1848. DE QUATRETAGES. *Les pierres précieuses* (R. d. Deux M., 15 août). — 1855. BABINET. *Diamant et pierres précieuses* (R. d. Deux M., 1^{er} mars). — 1880. JANNETAZ. *Diamant et pierres précieuses* (R. d. Deux M., 15 août). — 1888. PYLIAEFF. *Les pierres précieuses, leurs propriétés, leurs gisements et leurs emplois* (en russe) (Saint-Petersbourg, in-8° de 390 p.). — 1897. BARRINGER. *Description of minerals of commercial value* (New-York, 168 p.). — 1899. STREETER. *Precious stones and gems* (6^e édit., 356 p.). — 1900. KUNZ. *The prod. of prec. stones in the Un. St.* (Washington, 48 p.). — 1903. *Edelstein Production Kaliforniens* (Z. f. pr. G., p. 47). — 1909. L. DE LAUNAY. *Les Rich. min. de l'Asie, gemmes de l'Oural*, p. 576 à 579, *de Transbaïkalie*, p. 531. — *Mineral Resources et Mineral Industry des Etats-Unis* (precious stones) ; Rapports annuels. — DOUGLAS STERRETT. *The prod. of gems and prec. stones in 1909* (U. S. geol. Surv., 74 p.).

² T. 1, p. 399 à 439.

³ Voir t. 1, p. 650 (apatite) ; 715 à 718 (turquoises) ; 791 (cristal de roche) ; 796 (opale).

⁴ Tome 1, p. 852.

⁵ Tome 1, p. 853 à 855.

⁶ Tome 2, p. 240 à 245.

⁷ Tome 2, p. 621 et 703.

A. Parmi les gisements de silicates précieux, on doit citer, avant tout, les filons de granulite, de pegmatite, ou de quartz dérivé des pegmatites, où l'on trouve (outre le cristal de roche, le feldspath et le mica qui sont les éléments constitutants de la roche), tourmaline, topaze, phénacite, euclase, apatite, émeraude, cymophane.

B. Viennent ensuite diverses roches éruptives, telles que : les syénites néphéliniques ou zirconiennes (tourmaline, topaze, zircon, sodalite) ; les mélaphyres amygdaloïdes (améthyste, opale, zéolites) ; les serpentines (utahlite, etc.) ; les roches peridotiques (chrysolite, olivine).

C. Dans les calcaires métamorphisés par des intrusions ignées, on retrouve un grand nombre des minéraux signalés dans les groupes précédents, avec quelques autres : grenat, idocrase, chondrodite, lapis-lazzuli, tourmaline, émeraude, sphène, corindon, saphir, rubis, spinelle. Les auréoles de métamorphisme de certaines roches, syénites, microsyénites, etc., sont souvent très riches en grenat avec minerais. Ce sont les gisements que nous avons désignés sous le nom de type Banat.

D. Nous signalerons encore les terrains cristallophylliens, tels que les micaschistes, amphibolites, schistes cristallins, où un métamorphisme semblable a développé grenat, disthène, staurotide, cordiérite, saphirine, glaucophane.

Tous ces gisements sont reliés les uns aux autres par le lien commun du métamorphisme.

En outre, tous ces minéraux, par suite de leur dureté, ont subi, dans la préparation mécanique dont résultent les alluvions, une concentration, qui fait de celles-ci leur gisement industriel le plus ordinaire. On les y trouve souvent mélangés pêle-mêle après un assez long transport, sans que leur rapprochement corresponde à une réelle similitude de gisements.

Nous les décrirons rapidement dans l'ordre de l'énumération précédente, en classant chaque minéral dans le groupe de gisements où il est le plus fréquent, mais sans oublier que, suivant une remarque précédente, la plupart d'entre eux peuvent également se trouver dans des gisements d'un autre type. Cela nous permettra de mettre en évidence certaines associations caractéristiques, sur lesquelles nous reviendrons avec plus de détails en étudiant finalement, dans un paragraphe spécial, les gemmes de l'Oural et de la Transbaïkalie.

A. SILICATES PRÉCIEUX DES GRANULITES.

(tourmaline, topaze, émeraude, cymophane, phénacite, euclase).

Tourmaline. — Les tourmalines (borosilicates fluorifères d'alumine) sont un des minéraux caractéristiques des pegmatites ⁴. Dans bien des régions, les granites à mica blanc présentent une auréole de veines pegmatoïdes, qui se sont développées, soit dans les fissures de la roche même au voisinage des schistes encaissants, soit dans ces schistes, et où les fumerolles boriquées se sont traduites par le développement de la tourmaline. Le phénomène, qui est très caractérisé par exemple dans le Plateau Central

⁴ Leur nom vient de Turamali à Ceylan. Voir p. 309, 351, 623 à 625, et, t. 2, p. 33, 96, 161, 232, 348, 601, 613 à 615.

(Meymac, en Corrèze) a généralement produit des tourmalines noires (Schorl) inutilisables en bijouterie. Dans quelques points, on trouve, en outre, des tourmalines blanches transparentes, en bleues, roses, etc., qui sont recherchées. L'un des gisements classiques à cet égard est celui de l'île d'Elbe¹, sur le flanc du mont Capanne, près des villages de San-Pietro et San-Ilario in Campo, où les veines de pegmatite en stockwerk, larges chacune de 0,10 m. à 0,20, se trouvent au contact du granite avec les schistes.

En Californie, la San-Diego Tourmaline min. C⁷ produit par an environ 100 000 fr. de tourmalines brutes, qu'elle taille et polit à San Diego.

Sur le versant Est de l'Oural, dans les monts Ilmen, près de Miass, nous verrons bientôt² exploiter des tourmalines et topazes associées à des syénites et granites sodiques à microcline vert.

Depuis 1907, on a également extrait à Madagascar (Ankaratra) de beaux cristaux de tourmaline très volumineux à nuances changeantes, et d'autres tourmalines jaune d'or, vertes, rouge rubis (rubellites).

Une exploitation assez importante de tourmalines rouges (rubellite, ou rubis de Chine) se fait en Birmanie, dans la région des mines de rubis. On les extrait par des puits de 15 à 20 m. de profondeur, qui atteignent des veines de pegmatite altérées. Des trouvailles semblables ont été faites à Hpai Baing (Millaunggon) et Sanka³.

On observe encore, dans certains calcaires ou dolomies, des tourmalines développées par métamorphisme, telles que les tourmalines vert émeraude du marbre de Saint-Beat, les tourmalines vertes de l'Hauach, à l'Est de Blida, prises par Ville pour de l'émeraude⁴, etc.

Enfin la tourmaline se présente avec pyrite dans certains gypses des Pyrénées ou d'Algérie.

Topaze⁵. — La topaze est un silicate d'alumine fluoré : $5[Al^2O^3SiO^2] + Al^2SiF^{10}$. En joaillerie, on estime surtout les topazes d'un jaune riche du Brésil et la topaze rouge qu'on appelle improprement topaze du Brésil. Les topazes brûlées peuvent s'obtenir en chauffant des topazes dans un bain de cendres ou de sable : ce qui altère peu leur dureté⁶.

Le gisement habituel de ce minéral est dans les granulites, pegmatites, ou filons stannifères connexes, en compagnie du quartz et de la tourmaline. On en rencontre également dans des rhyolites américaines.

En ce qui concerne sa genèse, il y a lieu de noter la présence fréquente, dans les topazes, d'inclusions liquides à bulle mobile, chargées de petits

¹ 1906- L. DE LAUNAY. *Carrières de Tourmaline de l'île d'Elbe*. (La Nature, 9 juin, n° 1724).

² Tome 1, p. 840 à 842.

³ *Min. Ind. for.* 1907, p. 808.

⁴ LACROIX. *Min. de la France*, t. 1, p. 109.

⁵ 1809. R. JAMESON. *On the topaz of Scotland*. — 1866. KORSCHAROW. *Catalogue des topazes russes* (en russe) (Saint-Petersbourg). — 1881. GORCEIX. *Topazes d'Ouro-Preto* (Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto ; Extrait dans le Bull. des Ann. des M., 1881, p. 50). — 1900. *Topazes du Schneckenstein* (Z. f. pr. G., p. 29). — 1901. A. DEBRY. *Topaz near Ouro Preto* (Am. J. Sc., 10 p.). — 1906. ANDERSON. *Records of Australian museum Sydney*, p. 69-79. — *The mineral Industry for 1907*, p. 809.

⁶ Le pycnite est une variété de topaze bacillaire jaunâtre ou rougeâtre.

cristaux, les uns cubiques, les autres rhombiques, qui se dissolvent dans le liquide lorsqu'on élève la température et se régénèrent par refroidissement. Ces inclusions, longtemps regardées comme de l'acide carbonique liquide, seraient, d'après Nordenskiöld, constituées par un carbure d'hydrogène.

On considère généralement la topaze comme formée par l'action de la vapeur d'eau sur des composés fluorés ou borés. Friedel est arrivé à la reproduire en partant de cette idée.

A l'état microscopique, elle fait parfois partie intégrante des minéraux de seconde consolidation de pegmatites : ainsi au Schneckenstein près d'Auerbach en Saxe, à Montebas (Creuse).

Des cristaux de plus grande taille se rencontrent en druses dans la granulite : dans l'Oural, à Alabachka, près Mursinka, environs d'Iékaterinbourg ; aux monts Adoun Tcholon, en Transbaïkalie, où ils sont associés à des émeraudes ; aux monts Ilmen, district de Nertchinsk ; en Irlande, dans les Mourne Mountais ; en Moravie, à Rozena.

On en trouve dans les filons stannifères d'Altenberg, d'Ehrenfriedersdorf (avec fluorine violette, apatite et herdélite), de Geyer en Saxe, de Zinnwald en Bohême ; du Michaels Mount (avec apatite) et de Huelkind près Sainte-Agnès, en Cornwall.

Au *Schneckenstein* en Saxe, la topaze forme, avec tourmaline et quartz, une sorte de roche particulière, nommée topazosème par Hauy, d'où proviennent les topazes dites de Saxe, en cristaux courts très nets d'un jaune paille.

Au Brésil, Gorceix a décrit en détail les célèbres gîtes de *Boa-Vista*, aux environs d'Ouro-Preto, où l'on exploite la topaze, l'euclase et la phénacite. Il a constaté que les minéraux occupaient une fente au milieu des schistes micacés de la région : fente qui est en rapport avec une des principales dislocations de la province de Minas-Geraes. Ces topazes de Boa-Vista sont généralement taillées et classées à Rio-Janeiro, puis transportées à Lisbonne.

Certains échantillons de *Monroë* (États-Unis) semblent provenir d'un gisement analogue.

Enfin, beaucoup des topazes utilisées en joaillerie, et souvent les plus belles, proviennent de gîtes d'alluvions (sables diamantifères de Minas-Geraes, sables aurifères de la rivière Sanarsk, dans l'Oural, de l'Ouest de Ceylan, etc.).

Dans ces dernières années, on a trouvé, en divers points du *New South Wales*, en Australie, de beaux cristaux de topaze pesant jusqu'à 200 gr., bleus, verts et blancs, associés avec du quartz. Certains cristaux avaient 5 cm. de long. Près d'Emmaville, il y avait association avec du béryl ; à Heffanan's Lease, avec du wolfram, satellite ordinaire des filons d'étain.

Émeraude¹. — L'émeraude, ou béryl, est un silico-aluminate de glucine. Son emploi comme gemme est très ancien ; les Romains la tiraient du mont Sabara en haute Egypte, et on en a trouvé des bijoux dans les

¹ On appelle généralement : *émeraude*, les variétés vertes utilisables en bijouterie ; *béryl*, les variétés pierreuses ou de teintes diverses ; *aigue marine*, les cristaux vert bleuâtre de Sibérie.

ruines d'Herculanum. Par son prix, elle se classe après le diamant et le rubis. Pour faire valoir sa couleur, on la taille généralement avec une table au-dessus et des facettes tout à l'entour et au-dessous.

Pendant les trois derniers siècles, la grande source d'émeraudes a été le gisement colombien de Muso (en Nouvelle Grenade), d'où viennent les plus gros cristaux connus.

On tire également de très belles émeraudes de l'Asie Russe (Transbaïkalie, Altaï, Oural).

Les gisements d'émeraude se rattachent à trois groupes : a) granulites et gites stannifères ; b) micaschistes ; c) calcaires métamorphiques.

a) **Émeraudes dans les granulites et gites stannifères.** — Nous citerons, à titre minéralogique : les pegmatites de l'*île d'Elbe*, qui renferment de jolis cristaux d'émeraude incolores ou rosés très éclatants, implantés dans des géodes avec quartz et tourmaline ; les pegmatites de la *Vilate* et de *Chanteloube*, etc... près Limoges (Haute-Vienne), où les béryls, à l'état de masses cristallines plus ou moins translucides, atteignent souvent des dimensions considérables ; les filons d'étain de la *Villeder* en Morbihan ; les granulites des environs d'Autun (Saône-et-Loire), au parc de *Montjeu*, etc.

Au Brésil, le principal gisement est le *Rio San Matteo*. On a également trouvé en 1910, le plus grand cristal connu d'aigue marine, à *Marambaya*, sur le Jequithinhonha (Minas Geraes). Ce cristal, d'un vert bleuâtre absolument transparent et sans inclusion, pesait 110,5 kg et mesurait 48,5 cm. de long.

Dans l'Hindoustan, on cite *Canjargum*.

En *Sibérie*, on trouve, dans l'Altaï, des cristaux de béryl bleu qui atteignent 1 m. de long sur 15 cm. de diamètre. En dehors de l'Altaï, les principaux points producteurs d'émeraudes en Russie d'Asie se trouvent dans l'Oural, associés à des filons de granulite et de pegmatite traversant les schistes minces à Chaitanka et Monézinka au Nord d'Iékatérinenbourg et en Transbaïkalie, dans les monts *Adoun Tcholon*, où l'émeraude se présente dans une roche de topaze et de quartz analogue à celle que nous avons citée en Saxe¹.

*Madagascar*² produit, depuis 1902, un très beau béryl rose, dit *morga-nite*, dont on ne connaissait pas encore d'exemple aussi pur. Le gisement est à Maharitra, sur le Sahotony, affluent du Manandora, dans des pegmatites traversant des micaschistes calcarifères et quartzites. On trouve, en même temps, la tourmaline et une variété rose de triphaue, la kunzite.

De tels béryls roses ont été également rencontrés à Pala, comté de San Diégo, en *Californie*.

L'émeraude existe fréquemment dans les granulites à l'état de cristaux hexagonaux microscopiques de première consolidation.

Comme filons d'étain, mentionnons : Ehrenfriedersdorf en Saxe, Schlaggenwald en Bohême, etc.

¹ L'École des Mines possède de nombreux échantillons de ce gisement. Voir, plus loin, le paragraphe relatif aux gemmes de l'Oural.

² 1908. A. LACROIX. *Les minéraux des filons de pegmatite de Madagascar* (Bul. Soc. Min., t. 31, p. 50 et p. 218-247). — 1910. G.-Fr. KUNZ (Am. J. Sc. 4^e, t. 30, n^o 176, août), p. 842.

b) **Émeraudes dans les micaschistes.** — La mine de la rivière Toko-woïa, près d'Iékatérinenbourg, dans l'*Oural*, renferme des émeraudes d'un assez beau vert, mais généralement peu transparentes, en noyaux empâtés dans le micaschiste; elles sont associées avec de la phénacite, de la cymophane, de l'apatite, du rutile, de la fluorine, etc.

Les émeraudes africaines méritent une mention spéciale, en raison de l'existence d'un gisement classique de ce minéral, auquel on a attribué une réelle valeur industrielle : celui du *Djebel Sabara*, au voisinage de la mer Rouge¹. Ces émeraudes ont eu une grande réputation dans l'antiquité. C'est de là, dit-on, que venait l'émeraude classique, à travers laquelle, suivant Pline, Néron regardait les jeux du cirque; c'est le même gisement qui a fourni la pierre placée au sommet de la tiare pontificale. Les anciennes mines sont situées à environ 120 km. au Sud d'*Um-Rus* et à 35 km. du port de *Shenu-Seik*.

Les émeraudes s'y trouvent, dans des conditions que l'on observe également en Sibérie, en noyaux empâtés dans un massif de micaschistes, qui apparaît, sous le grès nubien, à l'Ouest du *Djebel Nihari* et au Sud des mines d'or de Hamech et qui se prolonge, par le *Djebel Sabara*, jusqu'à la mer. Elles semblent donc en relation avec les actions granulitiques, qui ont exercé un métamorphisme sur ce terrain.

Outre ce gisement du *Djebel Sabara*, on en signale un autre en Afrique, à *Rovuma*, à l'Ouest du *Kilimandjaro*, où les conditions minéralogiques doivent être analogues.

À *Madagascar*², on a trouvé, dans les rivières descendant du massif d'*Ankaratra*, sur la côte occidentale, des fragments transparents d'aigue marine bleuâtre.

c) **Émeraudes dans les calcaires.** — L'émeraude, que ses gisements habituels rattachent aux actions minéralisatrices ayant accompagné les granulites, se développe, dans quelques gisements, au milieu de calcaires assez récents, comme un minéral de métamorphisme; c'est le cas dans la mine célèbre de *Muso*, à 100 km. de Santa Fe de Bogota dans la Cordillère orientale de la Colombie, d'où proviennent les cristaux les plus renommés pour leur transparence et leur belle couleur³.

Les émeraudes de *Muso* sont réparties en veines, avec des cristaux de quartz, pyrite et calcite, au milieu d'un calcaire bitumineux noir très fossilifère et de schistes noirs appartenant au terrain néocomien. Le calcaire lui-même renferme de nombreuses émeraudes microscopiques et une assez forte proportion de glucine, qui pourrait y avoir été introduite par une action chimique postérieure. Des veines analogues se retrouvent vers Santa Rosa et à Yacopi, près *Muso*, où elles ont donné lieu à diverses spéculations financières.

Les émeraudes, lorsqu'elles sortent de la mine, sont, raconte-t-on, tellement fragiles, qu'il suffit de les presser un peu dans la main pour les briser; mais elles se durcissent rapidement à l'air.

¹ CAILLAUD. *Émeraude du Mont-Sabara*. — L. DE LAUNAY. *Richesses minérales de l'Afrique*, p. 283.

² LACROIX. *Minér. de la France*, t. 2, p. 21.

³ LEWY. *Émeraudes de Muso* (Nouvelle-Grenade).

Ces mines fameuses, exploitées depuis trois siècles, appartiennent au gouvernement Colombien, qui les a offertes dernièrement en gage d'un emprunt de 60 millions ¹.

Mode de formation de l'émeraude. — Pour éclaircir l'origine de l'émeraude, nous ajouterons à ces descriptions de gisements quelques mots sur les inclusions observées dans ce minéral et la façon dont on a réalisé sa synthèse.

Ces inclusions sont abondantes et assez caractéristiques. Dans le béryl de Montjeu, près Autun, on aperçoit déjà, à un grossissement de 80 diamètres, de grosses inclusions aqueuses souvent hexagonales, à côté d'autres inclusions de très petite taille et de même nature. Ces diverses inclusions ne sont pas rangées en files comme dans le quartz, mais régulièrement semées dans certaines plages du minéral.

Sorby a constaté, dans certaines émeraudes, des inclusions doubles à acide carbonique, et d'autres contenant un minéral cubique.

D'après ces inclusions et la nature des gisements, la genèse de l'émeraude serait à rapprocher de celle des autres minéraux associés à l'étain.

Il est possible cependant que, dans les calcaires métamorphiques, on doive faire intervenir la seule action des carbonates alcalins.

Ebelmen a d'ailleurs obtenu la synthèse de l'émeraude (1848) en soumettant à l'action d'une très haute température des mélanges en proportions diverses d'acide borique et d'émeraude naturelle pulvérisée.

Cymophane. — On peut rapprocher de l'émeraude les autres silicates de glucine, cymophanes, phénacites, euclases. Le cymophane (variété alexandrite) est un aluminat de glucine, qui présente, comme l'émeraude, de belles couleurs vertes, avec des variations singulières de teintes. On en trouve dans l'Oural.

Phénacite. — La phénacite, ou phénakite, est encore un silicate de glucine, qui accompagne fréquemment la topaze dans les pegmatites de l'Oural, et l'émeraude dans les micaschistes de Sibérie. Sa couleur est incolore, jaune ou brune.

Euclase. — L'euclase (silico-aluminat de glucine) a généralement une couleur vert d'eau pâle ou bleu ciel, avec un polychroïsme très marqué. On la trouve dans les filons de quartz à topaze du Brésil (à Boa-Vista) et dans des filons analogues de l'Oural.

B. — SILICATES PRÉCIEUX DES ROCHES ÉRUPTIVES (Chrysolite, olivine, bénoïte, jade agalmatolite) ²

Péridot. — Le groupe du *péridot*, dont la formule est $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, avec substitution partielle du fer au magnésium, comporte quelques gemmes,

¹ Les mines de Muso avaient été reconnues dès le premier voyage de Fernand Cortez. Celui-ci en avait rapporté cinq beaux joyaux, qu'il refusa, paraît-il, à la femme de Charles-Quint, pour les donner à sa fiancée.

² Nous verrons, dans le paragraphe consacré à l'Oural, les minerais associés aux syénites néphéliniques, p. 841.

telles que la *chrysolite*, ou péridot noble d'Orient, d'un vert jaunâtre, où entrent des traces de nickel et l'*olivine*, ou péridot granulaire, analogue à la chrysolite, mais un peu plus ferreux. Le gisement ordinaire du péridot est dans les basaltes.

L'exploitation industrielle des formes de péridot utilisées en bijouterie, chrysolite et olivine, est assez rare. Habituellement, la chrysolite est d'un vert pâle ou jaunâtre. Pour qu'elle prenne de la valeur, il faut qu'elle soit transparente et d'un vert foncé. On cite deux exploitations principales (Arizona et Mer Rouge).

La première, commencée en 1904, est à *Mesa*, près Taklai, dans l'Arizona. Les cristaux y ont atteint 3 cm. de long et un poids de 40 gr. La roche mère est une péridotite, associée à de l'obsidienne dans un cañon nommé le Péridot Cañon. Les cristaux sont recueillis dans les parties poreuses et altérées de la roche. On en a produit pour environ 25 à 30 000 fr. par an pendant quelques années.

Le second gisement, d'une importance bien supérieure, est situé sur la *Mer Rouge* un peu au Sud du parallèle d'Assouan, dans l'île de Sebirget ou Saint-Jean, sur le prolongement du Cap Ras-Benas¹. Dans un petit îlot d'un abordage difficile, il existe une belle péridotite à grain fin, avec grands cristaux isolés de forme ordinairement tabulaire. L'altération de cette roche à la surface est très intense et particulièrement accentuée suivant certaines veines ou fissures, dans lesquelles on trouve alors les cristaux isolés de leur gangue, ou du moins à peine empâtés dans une masse blanchâtre presque sableuse, avec recristallisation de silice secondaire à leur contact. En 1906, on en extrayait par an environ 40 kg. de belles pierres valant 250 à 300 000 fr.

Benitoïtite². — La benitoïtite (silico-titanate de baryte) est un minéral trouvé en 1907 en Californie et dont la remarquable couleur bleue, semblable à celle du spinelle bleu ou du saphir, a vivement attiré l'attention. Son gisement est au Sud du Mont Diabolo, près du Comté de San Benito, vers 36°,20 de lat. Il est en cristaux disséminés dans des veines d'une roche basique traversant les schistes et associé avec une zéolite sodique. Sa couleur peut passer du bleu au violet; il est fortement dichroïque du blanc au bleu.

Serpentine. — La serpentine est souvent travaillée comme pierre décorative, notamment à Penzance (Cornwall).

Utahlite. — L'utahlite est une variété de serpentine d'un vert intense, parfois translucide, que l'on exploite à Dugway (Utah) et au Colorado et qui parfois prend des irisations comme l'œil de chat.

Jade³. — Parmi les minéraux vulgairement désignés sous les noms de jade et jadéite, il y a lieu de distinguer un certain nombre d'espèces se

¹ 1908 (*La Nature*, 7 juil. ; suppl.).

² 1907. G. DAVIS LOUDERBACK. *Benitoitit* (Univer. of California. Bull. of the Dep. of Geology, t. 5, n° 9, p. 149-153. — *Min. Ind. for 1907*, p. 793).

³ *Rich. min. de l'Asie* (p. 60, 118, 344 et 768, avec bibl.).

rattachant, les unes au groupe du pyroxène, les autres au groupe de l'amphibole, que nous allons rapidement énumérer.

La *jadéite*, ou *jade* proprement dit, qui a été beaucoup travaillée par les Chinois et aussi par les anciens Mexicains, est, comme l'a montré Damour, un silicate d'alumine sodifère susceptible de fondre à la flamme de l'alcool, et dont on ignore le gisement précis, bien qu'on ait trouvé, par exemple, en Morbihan, des variétés de pyroxène associées à des églonites, qui s'en rapprochent beaucoup.

La variété de jade, dite *néphrite* de Chine, très différente de la précédente, est une sorte de trémolite compacte (silicate de magnésie, chaux et fer), devant sa grande tenacité à l'enchevêtrement de fibres, dont la composition minéralogique est la même que celle de l'amiante. D'après Lacroix, les haches de Nouvelle-Calédonie seraient de cette variété, qui a fourni la plus grande partie des objets réputés taillés dans le jade¹.

Enfin, une bonne partie du *jade oriental* de l'Asie, de l'Asie Centrale, de la Chine et des îles du Pacifique, appartient à une autre variété d'amphibole, la hornblende.

C'est surtout pour les objets en néphrite, de beaucoup les plus nombreux, que s'est posée une question d'origine, fort intéressante pour la préhistoire. Nous n'en dirons ici qu'un mot.

Il est certain que, dès les temps les plus reculés, des objets de néphrite ont été utilisés dans la civilisation méditerranéenne. On en a eu notamment la preuve par les objets en néphrite trouvés dans les couches les plus anciennes de Troie. En France, les haches en néphrite sont nombreuses ; d'autres sont en jadéite. Mais cela n'implique rien sur leur provenance, que l'on a autrefois voulu nécessairement chercher dans l'Asie Centrale. Les Égyptiens n'ont pas employé de néphrite et, en Assyrie, sur tant de milliers de cylindres, on en a, paraît-il, trouvé un seul en néphrite : ce qui paraît peu compatible avec un grand mouvement commercial exportant cette substance depuis l'Asie Centrale jusqu'aux extrémités de l'Europe Occidentale. On a, d'ailleurs, retrouvé de la néphrite en Silésie, à Jordansmühle, et on en connaît aussi dans l'Amour (monts Jablonov), sans parler du Mexique. La question archéologique du jade a donc perdu de son intérêt. Les gisements classiques du Turkestan n'en valent pas moins une courte description.

Le centre principal de la production du « Jade blanc » est dans la vallée de Kara-kach près de *Khotan*, où il existe de nombreux petits puits d'une dizaine de mètres de profondeur. A l'époque de la prospérité du royaume de Khotan, la récolte du jade, qui se faisait après chaque grande crue, était, dit Reclus, inaugurée par le souverain comme une cérémonie religieuse ; les plus beaux galets étaient ramassés sous ses yeux pour le trésor de l'Etat. D'après les Annalistes chinois, le fleuve de Khotan se formerait de trois cours d'eau, dont chacun roulerait des galets de jade d'une couleur spéciale : rivières du Jade vert, du Jade blanc, du Jade noir. En dehors des alluvions, on exploite la roche en place près de Balakchi, là où le Kara-kach se prépare à entrer dans le défilé de Chah-i-doulah. La roche principale est un gneiss syénitique, alternant avec des micaschistes

¹ Nous reviendrons sur la néphrite à l'occasion du magnésium, t. 2, p. 214, 221.

et schistes amphiboliques, où courent des veines d'un minéral blanc ayant jusqu'à 10 m. de puissance et renfermant elles-mêmes des veinules de néphrite. Celles-ci n'ont la couleur verte estimée que dans la partie centrale des veinules et sont blanchies sur les bords. On trouve, en outre, de nombreux galets de néphrite dans les affluents descendant des Kouen-lun, mais seulement là où ces monts renferment les mêmes roches de gneiss à amphibolites et pyroxénites.

Au voisinage de la mine de graphite Alibert, près du *lac Baïkal*, on connaît également de la néphrite¹.

Dans l'*Inde*, l'extraction d'un minéral qualifié de jadéite constitue une industrie importante dans le Burma supérieur près de Tamman (Myitkyina) par 25°44' et 96°14'. Il forme là une veine dans une serpentine vert sombre traversant des grès miocènes. Cette jadéite a été décrite comme résultant de l'altération d'une roche formée d'albite et de néphéline, dont la néphéline serait devenue de la jadéite². On a extrait, en 1905, 53 t. valant environ 1 100 000 fr., qui ont été exportées pour la plus grande partie par Rangoon. En 1907, le district de Myitkyina (Birmanie) a produit à Sanka pour 200 000 fr. de jadéite. On trouve, en outre, la pierre en noyaux dans les graviers de l'Uru, tributaire du Chindwin. Le prix est extrêmement variable suivant les qualités.

Agalmatolite. — L'agalmatolite, ou pagodite, que l'on trouve au Turkestan à 65 km. N. E. de Tachkent, près du village de Sailik, dans des porphyres feldspathiques décomposés et dans laquelle on taille des statues, est un silicate d'alumine analogue au jade.

C. — MINÉRAUX DES CALCAIRES MÉTAMORPHIQUES

(Grenats, idocrase, lapis, etc.).

Grenats³. — Les grenats sont des silicates doubles de bases sesquioxides (alumine, oxyde de fer ou de chrome) et de bases protoxydes (chaux, magnésie, fer, manganèse, chrome) répondant à la formule $3RO, R'^2O^3, 3SiO^2$. Ils comprennent un certain nombre de variétés : grossulaire (alumino-calcaireux), almandin (alumino-ferreux), pyrope (alumino-magnésien), spessartine (alumino-manganésien), mélanite (ferro-calcaireux), etc.

Les plus recherchés sont l'almandin⁴ : grenat oriental ou syrien, (escarboucle, grenat noble des anciens) qui tire son nom d'une ville de Syrie où on le polissait ; le pyrope rouge sang ou rouge feu de Bohême ; puis la spessartine (de Spessart en Bavière), qui va du jaune au rouge brun.

Les grenats sont des corps extrêmement répandus dans la nature, aussi bien en grands cristaux qu'à l'état microscopique. On les trouve rarement comme éléments de première consolidation, le plus souvent comme résultats d'actions secondaires médiatees.

¹ Voir plus haut, tome 1, p. 382.

² 1908. W. BLEECK. *Jadeite in the Kachin hills* (Rec. Ind., t. 36, p. 254-285).

³ 1900. OEWICHER. *Die Böhmisches Granallagerstätten und die Edelsteinseife des Seufzergründels bei Hinterhermsdorf in Sachsen* (Z. f. pr. G., p. 1 à 17).

⁴ On dit aussi almandine.

1° Comme élément de première consolidation (paraissant toutefois appartenir au terme extrême de ce stade), le grenat est surtout abondant à l'état d'almandin dans les *granulites*, en particulier dans les veinules de granulite introduites dans des schistes anciens ou dans les veines de quartz qui s'y rattachent.

La *diorite* contient parfois du grenat en telle quantité qu'on a cru devoir le considérer comme élément essentiel de la roche et donner à celle-ci un nom spécial (éclogite, kinzigite, etc.)

Il y a lieu de rattacher aux gisements dans les roches éruptives la présence fréquente de la mélanite dans les *roches leucitiques* ou néphéliniques : leucitophyres (Rieden, Perlerkopf, région du lac de Laack); leucotéphrites (Vésuve, Capo di Bove près Rome); leucitites (Vultur, près Melfi); syénites néphéliniques. Cependant le grenat n'y figure jamais qu'à l'état d'élément accessoire. Il est rare dans les labradorites et les basaltes, fait défaut dans les andésites, les trachytes, etc. On l'a trouvé, comme résultat d'actions secondaires médiates, dans les *nodules à wollastonite* enclavés au milieu des laves et, particulièrement, dans celles de la dernière éruption de Santorin.

2° Un second mode de gisement, où le grenat résulte d'actions secondaires, ce sont les gneiss, micaschistes, schistes chloriteux, schistes amphiboliques, serpentines et calcaires cristallins modifiés par des intrusions de roches ignées. C'est là surtout qu'il se présente en abondance très grande. Dans certains cas, comme pour les *amphibolites* et les *cornes vertes* du cambrien qui en sont pétries, il est difficile de retrouver exactement son mode de formation; cependant on peut admettre qu'on est là en présence d'anciens bancs calcaires intercalés dans les terrains gréseux et schisteux transformés en micaschistes et où les actions métamorphiques ont produit : d'une part, l'amphibole (silicate de chaux, magnésie et fer, qui semble toujours résulter d'une transformation de minéraux antérieurement existants), et, d'autre part, le grenat.

Certaines zones de schistes métamorphiques, où pénètrent des veines de granulite, arrivent à être criblées de gros grenats almandins¹.

Le développement de grenats par l'influence d'actions ferrugineuses sur des calcaires est très nettement visible dans les *calcaires cristallins* traversés par diverses roches éruptives, où se sont souvent développés des gîtes métallifères de contact avec grenats (type Banat, skarn de Norvège, etc.).

Les *expériences synthétiques* ont permis de reproduire le grenat par fusion de ses éléments (Von Kobell, Mitscherlich, etc.). Au contraire, le chlorure et le fluorure de silicium à haute température ne semblent pas susceptibles de l'engendrer. Ce qui concorde bien avec son mode de gisement très différent de celui des minéraux stannifères.

Gisements industriels — A *Dlaskowitz*, 60 km. N. W de Prague en Bohême, le grenat se présente à l'état d'élément remanié dans des graviers de 2 à 4 m. d'épaisseur reposant sur le terrain crétacé et composés de débris fortement altérés de basalte, de gneiss, de psammite et

¹ J'ai spécialement étudié une zone de ce genre à l'Est de Bourganeuf (légende de la feuille d'Aubusson).

de calcaire; ce gravier contient une forte proportion de sables quartzeux et de pierres dures, parmi lesquelles dominent le pyrope et le zircon. On y trouve aussi du spinelle rose et noir, du corindon hyalin bleuâtre, de la chrysolite, de la tourmaline, du pyroxène, de l'amphibole, etc... En 1870, on y a rencontré, dit-on, un diamant de 57 mmg. L'exploitation présente un certain développement.

Dans l'*Oural*, on exploite, près de l'usine de *Polewsk* (district de *Sisertsk*)¹, une variété particulièrement belle de grenat, qui fut d'abord prise pour du chrysobéryl. Ce minéral se trouve dans une roche serpentineuse et ressemble beaucoup à l'émeraude, dont il diffère seulement par sa dureté relativement faible.

Il est transparent, d'un vert un peu jaunâtre ou d'un vert d'émeraude quand il contient un peu de chrome, d'un éclat très grand. On en fabrique de fort beaux bijoux.

Aux *États-Unis*, on a, en 1889 et 1890, extrait pour environ 20 000 fr. de grenats près de *Gallup* (New-Mexico) et *Fort Défiance* (Arizona). Actuellement, la principale exploitation est dans les *Adirondacks*, qui produisent 4 à 5 000 t. par an, valant 150 fr. la tonne. On extrait, en outre, quelques tonnes à *Marshall*, en *North Carolina*. Ces grenats servent comme abrasifs.

Aux *Indes*, on travaille, dans le *Rajputana*, quelques mines de grenats qui produisent 35 000 kg., valant 3 fr. le kilogramme. Les mines principales sont celles de *Kishengarh*, exploitées par l'Etat d'avril à octobre et livrées au public pendant les autres six mois. Il y travaille, pour l'Etat, de 200 à 600 hommes et le revenu correspondant est d'une centaine de mille francs.

L'*Espagne* a exporté, en 1910, 700 t. de grenats aux *États-Unis*.

Idocrase. — Ce minéral est à rapprocher du grenat, dont il diffère par sa cristallisation dans le système quadratique.

Sa couleur varie du vert émeraude au jaune miel, au brun rouge, ou au bleu ciel (cyprine teintée par du cuivre). On le trouve dans les mêmes conditions que le grenat, dans des calcaires et schistes métamorphiques; un de ses gisements classiques est dans les blocs dolomitiques de la *Somma* au *Vésuve*.

Lapis-lazuli. — Ce minéral, auquel on donne également le nom d'outremer, est une sorte de feldspath sulfaté avec chlore, dont la couleur bleue paraît due à un sulfure de sodium et de fer ou à un sulfure d'aluminium. On a autrefois employé sa poudre en peinture; mais, depuis la découverte des bleus *Guimet* en 1828, il ne sert plus que comme pierre d'ornement.

Les gisements sont exclusivement asiatiques. La mine la plus connue se trouvait dans ce coin N. E. de l'*Afghanistan* qui se nomme le *Badakchan*, à *Firgamu*, par 36°10 de latitude et 71° de long. Aujourd'hui à peu près abandonnée, elle fut très considérable et *Marco-Polo* la cite déjà comme célèbre. La roche encaissante est là un calcaire blanc ou veiné au milieu des phyllades, dans lequel on trouve le lapis par masses compactes, avec de la pyrite et du mica. Un granite voisin a exercé son métamorphisme sur ce calcaire. On a exploité par galeries souterraines. Les

¹ 1878. *Richesses minérales de la Russie*, p. 122.

variétés indigo se nomment *Nili*, les bleu de ciel *asmani*, les vertes *sabzi*.

Un gisement analogue a été signalé en 1841 par Irvine dans les *Nag-pahar hills* de l'Ajmir, également en association avec la pyrite.

Cette pyrite, qui accompagne le lapis, correspond avec la présence du soufre dans sa composition.

D. — SILICATES PRÉCIEUX DES MICASCHISTES ET GNEISS (Disthène, staurotide, saphirine, glaucophane, cordiérite).

Disthène. — Le disthène (silicate d'alumine) est souvent en jolis cristaux bleu de ciel avec staurotide, grenat, etc., dans les schistes cristallins ou micaschistes (Thasos¹, etc.). Une variété bleu, dite cyanite, se trouve à Kotchkar (Oural) dans les alluvions aurifères.

Staurotide. — La staurotide (silicate d'alumine ferreux), dont le gisement est le même, est la « pierre de croix » ou croisette de Bretagne, que l'on utilise en broches, à cause de sa forme due à ses macles.

Saphirine. — La saphirine, analogue à la staurotide, avec substitution de magnésium au fer, est un joli minéral bleu dichroïque, analogue d'aspect au saphir, qui vient du Groënland.

Cordiérite. — La cordiérite (silicate de magnésie, chaux et fer) est remarquable par son polychroïsme, qui peut la faire paraître bleue dans un sens et blanc jaunâtre dans un autre. Elle se développe très fréquemment dans les gneiss et schistes granulitisés. La variété bleue forme le *saphir d'eau*, trouvé dans les alluvions de Ceylan. Une variété commune, dite Péliom ou lolite, est d'un bleu foncé et vient de Bavière.

Glaucophane. — La glaucophane est une amphibole sodifère bleue, que l'on trouve dans les micaschistes (Syra dans l'Archipel grec, etc.).

E. — GEMMES DE L'OURAL*

L'Oural contient un certain nombre de gisements minéralogiques, qui sont célèbres, non seulement par leur intérêt scientifique, mais aussi par la valeur marchande des gemmes et des terres rares (monazite, etc.) que l'on en a retirées. Pratiquement, un grand nombre des pierres précieuses fournies par l'Oural provient, comme dans tous les pays où l'on exploite les gemmes, des alluvions, où la préparation mécanique naturelle a concentré ces matériaux durs. C'est ainsi que les alluvions auri-

¹ 1898. L. DE LAUNAY. *Etudes géolog. sur mer Egée*, p. 78.

* Coll. Ec. d. M., n° 2546. — 1866. ZERRENER. *La mine de rubis de Kornilowsk* (Sibérie) (B. u. H. Z., 25^e année; cf. Cuyper, t. 20, p. 329). — 1877. MOUCHKETOV. *Matériaux pour l'étude de la structure géognostique du district minier de Zlatoust* (Journ. des Mines, t. 3). — 1882. MELNIKOV. *Les Gisements des minéraux des monts Ilmen* (Journ. des Mines). — Guide du Congrès de 1897: IV. A. AZRUNI. *Die Mineralgruben bei Kussa und Miask*; V. A. KARPINSKY. *Versant oriental de l'Oural*, p. 22 avec bibliographie et carte des gisements des monts Ilmen; VIII. *Gisements de minéraux d'Eugénie-Maximilianovna*. — 1888. POLIAEFF. *Les pierres précieuses* (Saint-Petersbourg, 1 vol. in-8°). — 1910. L. DE LAUNAY. *Les Rich. min. de l'Asie*, p. 576 à 579.

fières se sont trouvées fournir beaucoup de minéraux précieux. Tel est le cas de Kotchkar dans l'Oural méridional, où l'on a rencontré béryl, topaze rose, corindon, disthène, cyanite, euclase, etc. De même, dans l'Oural du Nord, vers le 59° degré, les sables de Sanarsk (50 km. E.-N.-E. de Troïtsk) contiennent euclase, rubis, saphir, topaze, disthène, zircon, rutile, etc. Il faut, dans un autre ordre d'idées, rappeler aussi les magnifiques pierres d'ornement qu'ont fournies les affleurements de certaines mines de cuivre, les malachites de Mednoroudiansk près de Nijni-Taguïlsk, celles du mont Blagodat, de Tourinsk, de Goumechevsk. Les gisements, dont il va être question ici, sont d'une autre nature : ce sont ceux où l'on trouve en place les silicates divers, que leur transparence et leur couleur permettent d'utiliser en bijouterie.

Ces gisements se présentent sur toute la longueur de l'Oural. On en connaît, par exemple, près de Troïtsk, ou du côté d'Iékaterinenbourg. Mais les plus importants et les plus célèbres sont ceux des monts Ilmen, au Nord de Miass.

Tous peuvent se ramener à quelques types fondamentaux. C'est d'abord, dans la région de Miass : (a) la roche dite miassite, qui est une syénite néphélinique à biotite contenant souvent des minéraux rares, comme les roches du même genre en Norvège, et surtout (b) les pegmatites (topaze, zircon, béryl, etc.), ou les granites sodiques à microcline vert qui l'accompagnent. Ailleurs (Nord des monts Ilmen), on a (c) de véritables roches d'anorthose et de corindon, spécimen intéressant de différenciation où l'alumine s'est trouvée libre. Puis c'est (d) l'auréole des syénites et microsyténites qui, avec les minerais de fer et de cuivre étudiés plus loin, renferme d'assez nombreux minéraux, dont le grenat est le principal, avec le spinelle, la pérowskite, l'ilménite, etc. Nous allons préciser ces conditions en parcourant quelques-uns des principaux gisements.

a. Le *groupe des monts Ilmen* comprend environ 150 gisements exploités entre le lac Ilmen, qui est à 2 km. Nord-Est de Miass, et le lac de Miass, qui est environ 12 km. plus loin, dans la syénite néphélinique, ou surtout dans les roches qui en dérivent, formant des filons à travers le gneiss encaissant. On y cherche les pierres colorées (Tzvetnyie Kamni), surtout le béryl, la tourmaline, la topaze, le zircon et le corindon.

Dans la syénite néphélinique même, ou miassite, les éléments constituants peuvent devenir très volumineux, jusqu'à 10 cm. de long. Un seul cristal de biotite pesait 62 kg. On observe, dans la miassite, la néphéline claire, grise ou verdâtre, la sodalite bleue, le zircon brun et l'ilménite (fer titané).

b. Recoupant le gneiss, les filons à microcline vert renferment dans leur masse, outre l'amazonite (microcline) parfois très recherchée, dont les cristaux peuvent atteindre 33 cm. (mine Lobarchov), de l'albite et du quartz. Certaines géodes contiennent l'amazonite cristallisée, l'albite, le cristal de roche, la topaze, le béryl, la phénacite, la tourmaline, la columbite, la samarskite, la monazite, le grenat et la cryolite. Les filons de syénite micacée, qui traversent également les gneiss, constituent de véritables mines de zircon, et de minéraux du niobium, du tantale, du thorium, etc... comme l'æschynite, la monazite : l'un ou l'autre de ces minéraux dominant suivant les points. Dans les filons de zircon, on trouve des

cristaux volumineux, dont l'un a atteint 3580 gr. La mine d'æschnite et de monazite, exploitée dès le XVIII^e siècle pour en extraire la muscovite, est la plus importante des exploitations de ce groupe.

c. Ailleurs on a des filons composés de feldspath, de biotite et de corindon, ce dernier minéral remplaçant le mica des syénites normales. On y a trouvé, outre le corindon diaphane, de rares échantillons bleus de saphir.

Citons, comme source de béryl, les mines de topaze du N.-W. : Kostchev, Trubeiev, Lissenko sur le lac Ielantchik, où l'on trouve des cristaux verts d'émeraude avec d'autres bleus ; surtout Lobatchev. Le corindon, ordinairement bleuâtre ou gris, a été observé en 1877 par Mouchkétov en cristaux bleus de saphir près de Séliankia. La cryolite a été rencontrée en un point, avec un autre fluorure analogue, la chiolite, en nids dans le granite à microcline de la mine de topaze située au Sud-Ouest du lac Vshivoïé dans des pegmatites normales ou des pegmatites à microcline. La topaze est très abondante, d'ordinaire en cristaux incolores ou jaunâtres, ayant souvent de 1 à 2 cm. de diamètre. On en a recueilli qui pesaient 4 kg. ; des cristaux valaient de 3 à 8 000 fr.

d. A l'Ouest de Miass, entre Zlatoust et Koussinsk, sur le versant Ouest de la chaîne, des gisements d'un tout autre genre sont fréquemment au contact des diorites avec des calcaires dévoniens, dans les auréoles de métamorphisme où se présentent le fer et le cuivre, parfois en connexion avec eux. On signale surtout les deux zones du mont Chichimskaïa avec grenat, ilménite, pérowskite, spinelle, titanite, diaspore, vésuviane rare, le mont Lipovaya ou Tchouvachskaïa avec une mine de pérowskite, le mont Nazemskaïa avec les mines Achmatovskaïa (ilménite, magnétite, titanite, diopside, grenat, vésuviane), Nicolaié-Maximilianovskaïa (spinelle, pérowskite, grenat, épidote, olivine, etc.).

Ce même type de gisements est celui du groupe Eugénie-Maximilianovna, découvert en 1894 à environ 16 km. d'Iékaterinenbourg (grenat, aigue marine, épidote, axinite, titanite, microcline, etc., sans parler des raretés).

Au Nord d'Iékaterinenbourg, il existe diverses mines d'émeraude dans des filons de granulite ou de pegmatite traversant les schistes micacés : Chaitanka (72 km. Nord d'Iékaterinenbourg), avec des cristaux remarquablement grands d'émeraude accompagnés de phénacite ; Monézinka (110 km. N.-E. d'Iékaterinenbourg), avec émeraude, topaze, tourmaline et belle pegmatite hébraïque utilisée pour l'ornement.

CHAPITRE XXVI

TITANE ET ZIRCONIUM

TITANE¹

Ti = 48,1.

I. — USAGES, STATISTIQUE ET PRIX

Usages et Propriétés. — Le titane, que l'on peut obtenir par réduction de l'acide titanique en présence du charbon au four électrique, n'a pas, jusqu'ici, d'emploi industriel important. On avait songé autrefois à l'utiliser pour fixer l'azote de l'air. La facilité de sa combinaison avec l'azote, mise en évidence par Wöhler et Sainte-Claire Deville, est telle, en effet, qu'on peut se servir d'un mélange d'acide titanique et de charbon pour protéger les creusets contre l'introduction de l'azote, dans le cas où ce gaz risquerait de troubler les opérations. Un minerai de fer titané fondu au haut fourneau donne, de même, une combinaison d'azoture et de cyanure de titane. Mais l'extraction de l'azote atmosphérique est aujourd'hui réalisée, comme nous l'avons rappelé dans un chapitre antérieur, par un procédé plus pratique.

Pendant on commence à utiliser une certaine quantité de titane dans la métallurgie du fer et, comme il existe, dans le monde, d'importants gisements de titano-magnétite tenant jusqu'à 10 et 15 p. 100 d'acide titanique, on peut, avec le développement de l'électro-métallurgie, s'attendre à une

¹ J'ai publié autrefois une monographie du titane : 1903. L. DE LAUNAY. *Le rôle du Titane en géologie* (Notes sur la théorie des gîtes minéraux, Ann. des M., janv., p. 42 à 61). — Voir encore : 1834. ELIE DE BEAUMONT. *Faits pour servir à l'histoire des montagnes de l'Oisans* (Ann. d. M., 3^e, t. 5, p. 3). — 1884. CHAPMAN. *On some deposits of titaniferous iron ore in the Counties of Haliburton and Hastings, Ontario* (Proc. and trans. of the R. Soc. of Canada, t. 2, p. 159). — 1886. PARMENTIER. *Le Titane* (Encyclopédie chimique). — 1896. KOLDERUP. *Das Titan-eisen Vorkommen von Ekersund-Soggen-dal* (C. R. Z. f. pr. G., 1897, p. 256). — 1899. J. F. KEMP. *The titaniferous iron ores of the Adirondacks* (U. S. geol. Surv., 19th report, p. 383-422; cf. métallif. ores, p. 281; Sch. of mines quart. July et nov.). — 1900. VOGT. *Weitere Unters. über die Ausscheid. von Titaneisenerzen in basischen Eruptivgesteinen* (Z. f. pr. G., p. 233 à 243). — 1900. O. LANG. *Titanhaltige Magneteisenerze* (Stahl und Eisen, n^o 7, p. 377-382; d'après Kemp). — 1901. KOLDERUP. *Bemerk. über Ausscheid. von Titaneisenerz in Norwegen* (Z. f. pr. G., p. 110 à 111). — 1908. BASKERVILLE. *The mineral industry*, p. 824. — 1910. BRADLEY STOUGHTON. *The mineral industry*, p. 655 à 660.

extension des applications, jusqu'ici restreintes, réservées à ce métal. L'addition d'un peu de titane au fer et à l'acier augmente notablement leur résistance à la traction et leur élasticité. On se sert de ferro-titane quand on veut obtenir beaucoup de densité et de dureté, comme pour les rails, les roues de wagon, etc.

On a encore, en 1908, proposé d'ajouter un peu de titane dans le moulage du cuivre pour y réduire les oxydes et s'éliminer de lui-même dans les écumes. Certains alliages d'aluminium et de titane ont également donné de bons résultats, etc.

D'autre part, le bel éclat produit par la combustion du titane le fait employer dans la pyrotechnie, dans les électrodes de lampes à arc (magnétite, oxyde de chrome et rutile), ou, très accessoirement, dans les manufactures de filaments pour lampes à incandescence, etc.

Le rutile, ou nigrine (bioxyde de titane) est employé depuis longtemps dans l'industrie dentaire, pour la fabrication des dents artificielles et dans la couverte des faïences et majoliques pour obtenir une nuance jaune d'ivoire.

Prix et statistique.—Malgré le grand développement de certaines titanomagnétites, le titane employé dans l'industrie est surtout extrait sous la forme de rutile.

Le rutile (bioxyde de titane) valait 4 à 6 fr. le kg. en 1886 ; 1 fr. 90 en 1890. En 1908, on cotait aux États-Unis le rutile à 97 p. 100 environ 500 à 800 fr. la tonne ; en 1909, moins de 500 fr.¹.

De 1875 à 1890, les carrières de Fogne en Gjerstad (Norvège), qui sont les principales de ce pays, ont produit environ 120 t. de rutile à 90 p. 100 d'acide titanique, et d'autres gisements de Norvège 10 à 20 t. L'extraction norvégienne monte aujourd'hui à environ 50 t. par an dans la région de Kragerø.

Aux États-Unis, l'American Rutile Co a des mines de rutile à Roseland, près Arrington (Nelson County, Virginia), qui, en 1909, ont donné 86 t. de concentrés à 85 p. 100, pour une valeur de 50 000 fr.².

On cite encore quelques exploitations en Australie : à Talunga et Mount Crawford (S. Australia) et dans le Queensland.

II. — MINÉRAIS. — RÔLE GÉOLOGIQUE ET CYCLES DU TITANE

Minerais de titane. — Les minerais de titane sont le fer titané ou ilménite, les titanomagnétites, les oxydes (rutile, brookite et anatase) et le sphène, ou silico-titanate de chaux.

Le *fer titané* (*ilménite* ou *crichtonite* de l'Oisans) est, comme l'oligiste, un sesquioxyde, dans lequel le titane remplace le fer : $(\text{Ti}, \text{Fe})_2\text{O}_3$. La *titanomagnétite* est de même comparable à la magnétite.

Dans les oxydes, le rôle du titane est tout différent. Le bioxyde de titane TiO_2 (60 p. 100 de titane) constitue trois minéraux distincts, de

¹ A Paris, le rutile vaut au détail (1914), 6 fr. le kg., et le titane 0,60 fr. le gr.

² La même région possède des filons de cassitérite.

même composition, mais de poids spécifiques croissants (*anatase* : 3,9; *brookite* : 4,17; *rutile* : 4,22), qui correspondent à des états de plus en plus condensés de la matière, obtenus, comme les carbones de plus en plus denses, à des températures croissantes¹. Le rutile est la forme stable, résultant de l'échauffement des autres oxydes, qui, dans cette opération, gardent leur forme cristalline, mais augmentent de densité. Ebelmen a même montré que l'on pouvait élever la densité du rutile à 4,28, en faisant réagir à haute température du métaphosphate de sodium sur de l'acide titanique.

Les synthèses de ces oxydes ont été obtenues par de nombreux procédés : acide titanique amorphe chauffé avec de l'acide borique, fondu avec du borax ou avec du carbonate de sodium ; décomposition du tétrachlorure de titane par la vapeur d'eau diluée dans l'acide carbonique ; action de l'acide chlorhydrique gazeux sur l'anhydride titanique en présence de fluorures, etc., etc.

Enfin le *sphène* représente la combinaison saturée de l'acide titanique avec la chaux.

Rôle géologique et cycles du titane. — Les propriétés du titane se résument en deux faits essentiels : d'une part, analogie avec le fer et l'aluminium ($Ti^2O^3, Fe^2O^3, Al^2O^3$) ; de l'autre, avec le groupe du silicium, de l'étain, du zirconium et avec le carbone² (TiO^2, SiO^2, SnO^2 , etc.).

L'association avec le groupe du fer et avec celui de l'aluminium se traduit par la substitution fréquente du titane à l'un ou l'autre de ces métaux dans les minerais. Les bauxites, où l'alumine et le sesquioxyde de fer coexistent en proportion variable, et qui passent progressivement aux minerais de fer en grains, contiennent souvent jusqu'à 4 p. 100 de titane. Mais, surtout, il existe toute une série de minéraux, où le titane remplace une partie du fer de l'oligiste ou de la magnétite, remplacé à son tour, à l'occasion, par d'autres homologues du fer (manganèse, magnésium, etc...), depuis l'ilménite théorique $(Ti, Fe)^2O^3$ jusqu'aux diverses magnétites titanifères, dans lesquelles il peut y avoir, outre la combinaison minéralogique, un simple mélange physique de fer titané et où l'on voit intervenir, en même temps, le vanadium.

Si l'on envisage, par exemple, le seul amas de Routivara en Laponie suédoise, avec sa surface de 300 000 m² et son cube d'au moins 200 ou 300 MT., sa teneur moyenne de 14 p. 100 d'acide titanique correspond à environ 25 MT. d'acide titanique.

Le rapprochement du titane avec le silicium et l'étain, signalé dans tous les cours de chimie, se traduit par les bioxydes analogues, et l'existence de ce bioxyde comme oxyde principal du titane constitue aussi une des ressemblances avec le carbone. En outre, on sait que le titane brûle dans l'oxygène avec une lumière éblouissante, décompose faiblement l'eau à 100° et donne, avec l'azote, une combinaison directe, assimilable au cyanogène : combinaison, qui, elle-même, dans les hauts-fourneaux, s'associe parfois avec du cyanure de titane. Nous allons voir tout

¹ Le rutile et l'anatase sont quadratiques; la brookite rhombique.

² Voir plus haut, t. 1, p. 22 et 46, quelques indications préliminaires sur le rôle du titane.

à l'heure le carbone et le titane s'accompagner dans maints gisements.

Ces derniers rapprochements ne sont peut-être pas sans rapport avec des coïncidences numériques entre les équivalents que nous avons autrefois signalées¹.

Il est intéressant de noter, pour ce métal, comme nous le ferons plus tard pour le fer², le rôle si important des remises en mouvement secondaires, qui arrivent à lui faire subir une série de cycles absolument complets. Sans insister sur les détails de cette question minéralogique³, il suffit, en ce moment, de remarquer que les cristaux de rutile subissent des pseudo-morphoses fréquentes et bien connues, soit en ilménite, soit en sphène, suivant qu'il y a pénétration de fer ou de chaux. L'ilménite part de la périphérie et gagne progressivement le long des clivages. L'ilménite ou la magnétite titanifère se transforment, de leur côté, très facilement en sphène (leucoxène) dans les éléments microscopiques des roches, par contact avec des éléments calcaires ; et, d'autre part, le sphène est susceptible de s'altérer en ilménite par réaction ferrugineuse⁴. La simple altération de l'ilménite, par disparition du fer, peut, à son tour, donner de l'anatase, qui, elle-même, revient, par paramorphose, au rutile, forme la plus stable parmi les oxydes.

Remarquons encore que l'oxyde de titane anhydre, malgré sa résistance à la plupart des réactifs chimiques, et, notamment, au plus énergique, l'acide fluorhydrique (ce qui permet de le séparer pratiquement de la silice), est néanmoins soluble dans l'acide sulfurique. La présence fréquente d'une certaine quantité de pyrite associée avec les magnétites titanifères a donc pu, par une oxydation superficielle, entraîner la dissolution du titane, qui a ensuite subi le sort du fer et de l'aluminium, auxquels il était associé. C'est peut-être la raison principale, pour laquelle l'anhydride titanique est un élément constant de toutes les argiles sédimentaires⁵. Toutes les fois que ces argiles ont subi ultérieurement un métamorphisme et une cristallisation avec ou sans feldspathisation, le rutile a cristallisé, et on le retrouve donc comme élément cristallin des schistes argileux, ardoises, phyllades, gneiss, micaschistes, etc... (d'où il a pu revenir de nouveau aux sédiments non métamorphiques). Quand il y avait éléments calcaires, la combinaison de l'oxyde titanique avec la chaux s'est effectuée, et c'est du sphène que l'on observe dans les amphibolites, pyroxénites, gneiss amphiboliques et pyroxéniques, cipolins, etc...

¹ *Le rôle du titane*, p. 46.

² Tome 2, p. 285.

³ Voir à ce sujet : Lacroix. *Minéralogie de la France* (t. 2, p. 233 ; t. 3, p. 487 et 495 ; articles anatase, brookite, rutile, fer titané, sphène).

⁴ Dans de nombreuses roches et, spécialement, dans des amphibolites, on assiste au passage du rutile au sphène (leucoxène) : celui-ci, pouvant, à son tour, donner de l'anatase, ou même du rutile, de l'ilménite, de la perowskite, de la calcite. Ainsi dans le granite amphibolique d'Algajola, en Corse, les cristaux de sphène brun abondants, qui atteignent 1 centimètre, sont souvent recouverts d'un enduit d'ilménite.

⁵ D'après A. Leclère, sa présence est très commune dans les terrains contenant de l'alumine, mais non à l'état de réelle diffusion. Les proportions, dans lesquelles on la rencontre et qui peuvent atteindre au moins 1 p. 400, sont très variables dans la masse d'une même formation sédimentaire, et la concentration a lieu généralement par strates.

Les mêmes minéraux existent encore dans les éléments ferrugineux des granites¹, syénites, etc... : c'est-à-dire du rutile développé par actions secondaires dans les micas, du sphène dans les amphiboles ou pyroxènes, et, suivant la théorie que l'on professe sur l'origine de ces roches, on peut considérer ce titane comme étant à un stade plus ou moins avancé de son évolution. Si, comme ce n'est pas impossible, on suppose que, dans les granites, syénites, etc., le rôle des sédiments résorbés et recristallisés a été considérable, le rutile des micas viendrait seulement de l'argile ; si l'on admettait un apport interne, ce serait la scorification des magnétites titanées, supposées exister en profondeur.

III. — GISEMENTS DU TITANE

Généralités. — Nous allons montrer comment la majeure partie du titane a été concentrée dans ses gisements naturels par un phénomène caractéristique de différenciation profonde. C'est l'origine des titano-magnétites et de la plupart des ilménites que nous étudierons en premier lieu. D'autre part, il a dû y avoir, à l'occasion des scorifications, départ en fumerolles donnant, avec intervention possible du bore ou du fluor, la cristallisation de l'anhydride titanique associée au quartz (le titane se rapprochant ici de l'étain). Ce sera la seconde catégorie de gisements à envisager.

1° MINÉRAIS TITANÉS DE FER²

Les minerais de fer titanés pris, en masse, sont, au premier chef, des minerais de profondeur et se trouvent, par suite, localisés dans les régions métallifères, telles que la Scandinavie, la Finlande, le Canada, le Nord des Etats-Unis, le Brésil, dont j'ai cherché ailleurs à mettre en évidence le caractère profond, tandis qu'ils forment à peine une exception rare dans les pays à plissements plus récents, comme le Midi de l'Europe³.

¹ L'analyse d'un granite moyen de la Creuse m'a donné 0,32 p. 100 de titane : chiffre qui, d'après Clarke, correspondrait précisément à la teneur moyenne pour l'ensemble de toutes les roches.

² 1893 PETERSSON et SÖGREN. Deux études indépendantes sur les magnétites titanifères de Routivara, en Laponie suédoise, publiées en janvier 1893, dans *Geol. Fören. Förh.*, résumées dans *Z. f. pr. Geol.*, 1893, p. 269, 270. — 1896. BLANKETT. *Ueber den Titanomagnetit Diallagit zu Välimäki in Finnland* (*Geol. Fören. Förh.*). — 1898. KEMP. *The Titaniferous Iron Ores of the Adirondacks* (New-York) (19th ann. Report of U. S. geol. Survey for. 1897-98). — 1899. KEMP. *A brief review of the Titaniferous Magnetites* (*School of Mines quarterly*). — 1900-1902. VOGT. *Weitere Untersuchungen über die Ausscheidungen von Titaneisenerzen in basischen Eruptivgesteinen* (*Z. f. pr. G.*, août 1900 à septembre 1901). avec discussion et résumé des travaux antérieurs ; — 1901. KOLDERUP. *Einige Bemerkungen über Ausscheidungen von Titaneisenerz im Norwegen* (polémique avec J. Vogt) (*Z. f. pr. G.*, mars).

³ Il suffit, pour s'en rendre compte, de consulter, à ce sujet, l'ouvrage si complet de A. Lacroix sur la *Minéralogie de la France*. L'ilménite n'y figure que pour des cristaux isolés, souvent microscopiques, en général dans les roches basiques, ou à l'état de produit secondaire du rutile ; à plus forte raison, quand on se localise dans la zone tout à fait méditerranéenne.

On a pu, dès lors, les prendre comme type de ces ségrégations directes, auxquelles les géologues, qui ont étudié ces régions, ont tout naturellement apporté une attention spéciale, parce qu'elles formaient le type caractéristique de leur pays. Leur étude constitue un chapitre intéressant de métallurgie naturelle, sur lequel on nous excusera d'insister.

Ainsi que l'a montré J. Vogt, on connaît aujourd'hui des centaines de gisements de minerais de fer titanés, en Scandinavie, en Finlande, au Canada, aux Etats-Unis (Colorado, Minnesota, New-Jersey, New-York, Caroline du Nord, Rhode-Island, Virginie, Wyoming)¹, au Brésil, etc. Tous se présentent en amas au centre de massifs basiques; à peu près tous dans des gabbros (labradorites, anorthosites, gabbros à diallage, à hyperstène ou à olivine); trois seulement dans des syénites néphéliniques: à Alnö en Suède², à Sao Paulo au Brésil, à Magnet Cove (Arkansas)³. Il y a là une loi absolue. Les minerais les plus titanifères, les ilménites à 40 p. 100 d'acide titanique, se trouvent dans les roches que Kjerulf a appelées des Labradorfels, à peu près exempts de silicates ferro-magnésiens et composées de labrador (ou d'anorthose). Au contraire, dans les roches acides, s'il y a ségrégation ferrugineuse sous une forme plus ou moins indirecte, ce qui reste incertain (à Gora Blagodot, Vissokaya Gora dans l'Oural, à Kirunavara en Laponie suédoise), ce sont, en tout cas, des minerais de fer à peu près complètement exempts de titane⁴.

Il faut nettement séparer, des gabbros où s'est concentré le titane, les péridotites, où, dans des conditions analogues, s'est rassemblé un minerai comparable de fer chromé. Ainsi que nous le verrons tout à l'heure à Andopen, le péridot paraît même aller d'un côté, tandis que le fer titané va de l'autre.

Il faut également, comme nous l'avons précédemment montré⁵, établir une démarcation tranchée entre le groupe des ségrégations de fer titané (et titano-magnétite) ou de fer chromé, qui se sont faites, à peu près sans exception, au cœur des massifs basiques, et les ségrégations sulfureuses (pyrites de fer cuivreuses, pyrrholines nickélifères, etc.), que l'on trouve parfois dans les mêmes pays, en relation directe avec les

¹ Les statistiques américaines mentionnent, au Colorado, à Grape Creek (Costilla County), des magnétites à 13 ou 15 p. 100 d'acide titanique, des minerais analogues près de Gunnison, dans le comté du même nom. On peut citer les masses du Mesabi (Minnesota), des Adirondacks (New-York), d'Iron Mountain (Wyoming, Albany County). Il existe aussi de l'ilménite dans l'Oural, etc. Comme comparaison, les minerais de fer de Mokta tiennent de 1 à 6 p. 100 d'acide titanique; ceux de San Thiago, 1,30; ceux de Segré, 0,407.

² Voir tome 2, page 317.

³ Nous avons vu t. 1, p. 382, le graphite de Sibérie dans la syénite néphélinique s'accompagner de minerais titanés. On peut remarquer également que la syénite néphélinique de Pouzac (Hautes-Pyrénées) contient du sphène. Dans la région de Passau, nous avons signalé aussi plus haut une syénite augitique à sphène et passuite au contact du graphite. On sait que la syénite éleolithique entre Drammen et Brevik est le siège des minéraux rares: gadolinite, cécrite, composés d'yttrium, de thorium, etc. Notons, à ce propos, l'association de monazite et graphite avec du titane et du fer dans des gisements brésiliens encaissés au milieu des gneiss ou schistes à sérécite (A. DERBY. Am. Journ. of Sc., 1902, p. 211).

⁴ Voir tome 2, pages 318 à 338.

⁵ Voir tome 1, pages 78 à 82.

mêmes roches, mais alors, presque toujours, sur la périphérie des massifs¹. L'on peut donc supposer que la liquation des oxydes ferro-titanés s'est opérée dans des conditions différentes de celle des sulfures, qui ont probablement présenté un caractère plus voisin de celui des fumeroles. Il en est de même de l'apatite, quand elle existe; la séparation de ce minéral a suivi une loi différente de celle à laquelle a obéi le titane et a probablement subi, elle aussi, une influence plus grande des actions volatiles. Quant à la raison pour laquelle les gabbros renferment des fers titanés, les péridotites des fers chromés (ou du platine), elle reste assez mystérieuse, et l'on peut toujours invoquer la composition primitive du magma fondamental. Il est cependant frappant que des différences assez faibles dans la nature des silicates produits, — par exemple, la substitution d'olivine à l'hypersthène, — paraissent avoir entraîné de grandes différences dans la ségrégation des métaux : avec un peu d'olivine dans un gabbro, nous trouverons, par exemple, de la titano-magnétite, et, sans olivine, de l'ilménite.

Ces lois ont été patiemment démêlées par J. Vogt au moyen de très nombreux exemples, dans lesquels il a suivi, par des séries d'analyses, les variations du magma rocheux depuis la roche mère jusqu'au noyau métallique; il a également cherché à mettre en évidence l'ordre de cristallisation des substances, les cas où la composition ferro-titanée a pris l'allure d'ilménite ou celle plus rare de spinelle ferro-titané², etc., les conditions où il s'était produit une concentration d'alumine, etc.; nous ne citerons ici que quelques-uns des faits rassemblés par lui, renvoyant pour les détails à ses divers mémoires.

Ainsi, à *Ekersund-Soggendal* (Norvège du Sud), on a, au milieu du Grundgebirge, un massif éruptif de 1.200 km², caractérisé par les pyroxènes orthorhombiques (enstatite, bronzite, hypersthène). Sa principale masse est un Labradorfels, formé surtout de labrador, avec un peu d'hypersthène, accessoirement de l'enstatite et de la bronzite, pas d'olivine, un peu de fer titané. Des filons, qui paraissent une dérivation directe de ce magma, contiennent de la norite à ilménite à teneur moyenne de 40 p. 100 de fer titané (exceptionnellement 70 à 80 p. 100), avec du labrador, de l'hypersthène et quelques noyaux d'apatite. Enfin, des veines, pouvant avoir 100 m. de long sur 2 à 6 m. de large, sont formées de fer titané avec très peu d'hypersthène et de labrador.

Aux mines célèbres de *Taberg*, en Småland³, une hypérite à olivine a donné un noyau de péridotite à titano-magnétite (avec plagioclase très basique), caractérisé par la présence d'un peu de vanadium (0,12 et 0,40 p. 100 d'acide vanadique dans le minéral, 0,25 dans la scorie) : métal qu'on a retrouvé dans divers gîtes du même genre, notamment aux Adirondacks (New-York).

¹ Nous avons déjà dit quelques mots de cette question, tome 1, page 80.

² La titano-magnétite, trouvée d'abord à Routivara, en Laponie suédoise, est aujourd'hui connue en quatre autres points de Scandinavie, à Andopen (Lofoten), à Stjernö en Finnmark, etc.

³ Voir plus loin, tome 2, pages 311 et 312. — TÖRNBERGM. (Geol. Fören. Förhand, t. 3, 1876; t. 5, 1881; t. 6, 1882). Il ne faut pas confondre ce Taberg avec celui du Wermland près Nordmarken.

Même concentration de titane et de fer à *Langö* et *Gomö*, près Kragerö, dans le sud de la Norvège, au milieu d'une hypérite à olivine ; dans les *Mesabi Range*, au Minnesota, au milieu d'un gabbro¹ ; à *Jacupiranga*, au Brésil, dans une néphéline à pyroxène passant à une pyroxérite à magnésite, avec pérowskite (titanate de chaux) et tantaloniobate.

De même, encore, dans la région des *Adirondacks* (New-York), où, d'après Kemp, les fers titanés sont dans un gabbro massif, accompagnant des anorthosites².

Enfin, aux environs d'*Andopen-Selvaag*, dans les îles *Lofoten*, la roche initiale étant un labradorfels à hypersthène, il s'est produit, au milieu d'elle, deux dépôts distincts :

a) d'un côté, la série suivante : 1° gabbro ferrifère ; 2° diallagite à titanomagnétite ; 3° titano-magnétite ;

b) d'autre part : 1° gabbros à olivine, de plus en plus riches en silicates de magnésie et de fer ; 2° péridotite à plagioclase ; 3° péridotite presque exclusivement formée de péridot.

Il y a donc eu là séparation progressive du fer titané allant dans un sens, des silicates ferro-magnésiens allant dans l'autre, avec tendance à l'isolement de plus en plus complet des éléments distincts, comme dans une métallurgie bien faite.

Généralement, dans ces minerais, on voit les oxydes de fer mouler les autres éléments, auxquels ils sont donc postérieurs : soit les silicates (hypersthène, olivine, etc.), soit les spinelles, quand il en existe, et la pyrite elle-même est entourée par la spinelle. C'est l'inverse de ce qui se produit ordinairement pour les fers chromés, entourés par l'olivine. Dans les laitiers ferrifères, l'ordre de consolidation est très variable.

D'une façon générale, de très nombreuses analyses chimiques, discutées par J. Vogt, ont mis en relief la concentration du titane dans le magma et montré comment se sont comportés, en même temps, les autres éléments. Il résulte de ce travail que la concentration paraît avoir subi trois étapes successives³.

Dans la première, la teneur en oxydes de fer et de titane est montée à 50 p. 100, tandis que celle de silice tombait à 20 ;

Dans la seconde, la teneur en oxydes ferro-titanés s'est élevée de 50 à 80 p. 100, la silice descendant de 20 à 8 ;

Dans la troisième, la silice est tombée presque à zéro.

D'une façon générale, pendant toute l'opération, on voit diminuer, à la fois, la silice avec l'alumine, la chaux et les alcalis qui l'accompagnent ; mais la décroissance de l'alumine est loin de se faire aussi vite que celle de la silice, et il peut y avoir, à la fin, un résidu d'alumine donnant des cristallisations de spinelles. La courbe de la magnésie subit le plus souvent une inflexion curieuse ; elle commence par augmenter, comme on

¹ WINCHELL. *The Gabbro titanite-iron group* (Geol. nat. hist. Surv. of Minnesota, Bull., n° 6, 1891).

² JAMES FURMAN KEMP. *The Titaniferous Iron Ores of the Adirondacks* (Geol. dep. of Columbia Univ., 1899).

³ Dans le mémoire sur *le Rôle du Titane*, j'ai reproduit quelques-uns des graphiques, par lesquels J. Vogt a mis ces lois en évidence (fig. 8 et 9).

pouvait s'y attendre dans un magma basique, et diminue finalement, sa séparation se faisant d'un autre côté. Suivant Vogt, il faudrait considérer les éléments basiques comme dissous dans les silicates alcalins (une partie de la silice jouant aussi le rôle d'élément dissous).

Il est utile de préciser les caractères de cette différenciation pour quelques-uns des éléments qui y interviennent et, d'abord, pour celui dont nous nous occupons à ce moment, le *titane*, en le comparant au fer.

D'après Clarke, si l'on considère l'ensemble de toutes les roches éruptives, basiques, neutres ou acides, leur teneur moyenne en titane serait d'environ 0,32 p. 100 contre 4,5 de fer : soit un rapport moyen de 1 à 15 entre le titane et le fer. Dans les gabbros, les deux métaux se sont condensés, le titane plus vite que le fer ; le rapport monte à 1 sur 10 ou 12.

Enfin, dans les minerais de fer titanés, on a, en moyenne, un rapport de 1 à 5 ou à 7,5, pouvant aller, comme termes extrêmes, de 1 sur 1 à 1 sur 16 (en laissant de côté les magnéto-corundites légèrement titanifères) ; ce qui montre combien s'est accentuée, dans cette dernière étape, la concentration du titane. Vogt s'est assuré que tous les minerais de fer des gabbros, sans exception, étaient titanifères et que, là où l'on n'avait pas signalé le titane, il y avait erreur d'analyse ; mais la proportion de ce titane peut être extrêmement variable.

Ainsi les roches à olivine et à titano-magnétite, englobées dans l'hypérite à olivine du Sud de la Suède, ne renferment que 6,30 à 8,50 d'acide titanique ; on en a 11,35 à 14,63 dans la titano-magnétite de Routivara et 12 à 15,5 dans celle de Solnör ; la teneur monte à 25 ou 30 dans l'ilménite de Radö, près Bergen, et elle atteint 41 à 46 p. 100 dans le Labradorfels d'Ekersund-Soggenal.

Ce titane est, soit en ilménite, soit en titano-magnétite. Dans deux cas seulement, on a signalé de la pérowskite, à Jacupiranga (Brésil) et Oberwiesenthal (Erzgebirge) : les deux fois dans une roche néphélinique avec apatite.

La concentration de l'*alumine*, dans certains gisements spéciaux des États-Unis, est arrivée, au milieu de roches analogues, à constituer de véritables gisements, peut-être comme terme extrême d'une localisation d'aluminate de magnésie.

A Rockingham (Caroline du Nord), c'est, d'après Pratt, du corindon, avec spinelle et enstatite, qui est venu ainsi former des masses, sur le bord d'une péridotite à son contact avec un gneiss.

Dans les Cortland Series (Westchester County, N.-Y.), au milieu d'un district de norites, il s'est opéré de même des ségrégations ferrugineuses, remarquables par leur forte teneur en alumine, tandis que le fer n'y dépasse pas 35 p. 100. Ce sont des magnéto-corundites, avec spinelles (hercynite), corindon, sillimanite, accompagnées de magnésie assez abondante, de silice rare et pouvant contenir localement 3,5 à 4,5 p. 100 d'acide titanique. Malgré cette présence du titane, on paraît avoir affaire là à une ségrégation différente de celle qui concentre le fer titané.

Parmi les autres éléments, l'oxyde de *manganèse* passe de 0,125 dans les roches à 0,25 dans les minerais ; c'est une concentration moindre que celle du fer, et le rapport des deux métaux est seulement de 1 à 150.

Le *nickel* et le *cobalt* sont très exceptionnels, peut-être en rapport avec des traces de pyrite. Nous avons déjà vu que le nickel avait dû partir d'un autre côté des mêmes roches basiques, sur le bord des massifs, avec les sulfures.

Le *vanadium*, presque constant dans les fers titanés, y a subi une très forte concentration, étudiée par Kemp aux Adirondacks¹. On a, contre 10 à 14 d'acide titanique, de 0,10 à 0,40 d'acide vanadique.

La présence du *carbone*, quoique l'attention n'ait pas été souvent attirée sur lui, est intéressante à signaler dans certains minerais de fer titané, en raison des discussions, rappelées précédemment², sur l'existence de ce corps dans les roches éruptives profondes et sur ses rapprochements avec le titane.

Hillebrand a reconnu, dans les minerais des Adirondacks, des quantités, faibles, mais dosables (0,05 p. 100), de carbone non combiné avec l'oxygène et, très probablement, à l'état de graphite. On a constaté une teneur analogue dans la Caroline du Nord. Ces analyses, rapprochées de celles d'A. Gautier, confirment ce que nous avons dit plus haut sur l'emprisonnement d'un peu de carbone dans la scorie silicatée et le bain métallique sous-jacent.

Le *phosphore* et le *soufre* paraissent, ainsi que nous l'avons dit, s'être différenciés tout à fait différemment du titane, probablement à l'état de combinaisons (phosphate de chaux, sulfure métallique). L'apatite, tantôt s'est concentrée avec le titane, comme à Alnö, Jacupiranga, dans les syénites néphéliniques, tantôt a, au contraire, entièrement disparu.

Quant aux *chlore*, *fluor* et *bore*, ils font partout défaut.

Si l'on cherche à se représenter la façon dont ces différenciations ont pu se passer, on est, ainsi que J. Vogt l'a fait remarquer, amené à laisser de côté, ou du moins à ne considérer que comme très accessoires, les actions d'attraction magnétique ou d'électrolyse; il y a eu là, sous pression et à haute température, une véritable opération métallurgique, analogue à celles que nous opérons dans nos fourneaux et nos creusets, lorsque nous cherchons à isoler un métal en faisant passer les éléments qui l'accompagnaient dans la scorie. C'est, évidemment, un ordre de phénomènes qui diffère beaucoup des cristallisations filoniennes hydrothermales. Cependant le rôle de l'eau et des fumerolles n'a pas dû être absolument négligeable, même dans ces phénomènes profonds.

2° TITANE EN MILIEU ACIDE — OXYDES DE TITANE, SPHÈRE, ETC.

Les gisements pratiques de titane présentent surtout ce corps sous la forme de rutilé en milieu acide. Ainsi les filons exploités à *Fogne*, en Norvège³, sont des pegmatites contenant du rutilé avec de l'apatite (1 du

¹ Cf. 1876. ISIDOR WALZ. *On the general occurrence of vanadium in American Magnetics* (Am. Chemist, juin, p. 453); — 1887. Eng. and Min. Journ., 23 avril, p. 291; 8 juin 1899, p. 519; — 1898. HILLEBRAND (Am. Journ. Sc., sept., p. 209).

² Tome 1, p. 48 et 43.

³ Voir plus haut, tome 1, page 344.

premier pour 2 à 5 du second). Dans le comté de *Nelson* aux Etats-Unis, on exploite également des pegmatites contenant orthose, albite, quartz bleuâtre, rutile, assez fréquemment apatite et hornblende. En certains points de concentration, le rutile arrive à former 5 à 35 p. 100 de la masse. L'on connaît encore, dans cet ordre d'idées, les gisements célèbres de l'*Oisans*, où l'anatase et la brookite accompagnent l'albite et le quartz dans des filons minces remplissant les fissures d'une granulite ou d'une aplite (parfois avec calcite et sphène). L'anatase, la brookite et l'ilménite se trouvent de même dans des filonnets d'albite, en *Morbihan*. Il suffit également de rappeler les cristallisations si fréquentes de rutile à l'intérieur de cristaux de quartz, constituant les cheveux de Vénus.

Dans un certain nombre de roches éruptives acides (granites, granulites, syénites), on trouve le sphène comme élément constant, toutes les fois qu'il y a eu assez d'éléments calcaires et magnésiens pour donner de l'amphibole ou du pyroxène : par exemple, dans les granulites à pyroxène traversant les cipolins de Sainte-Marie-aux-Mines (Alsace), dans les pegmatites à microcline en filons dans le cipolin du Labourd (Basses-Pyrénées), dans les granulites traversant le gneiss à pyroxène de Saint-Denis-le-Courreau (Loire), etc. De même, dans certains géodes de roches volcaniques, le sphène a visiblement cristallisé par sublimation (avec du quartz, du zircon, etc.)¹.

Enfin, A. Lacroix a signalé l'ilménite dans les produits d'émanation directe des granites de l'Ariège avec accompagnement de tourmaline. Il l'a retrouvée également assez abondante au voisinage des filons d'apatite à Oddegaarden, en Norvège, qui paraissent se relier à une venue granulitique².

Ces faits, qu'il serait aisé de multiplier, suffisent à montrer une cristallisation probable de l'acide titanique par intervention de minéralisateurs énergiques (peut-être de chloro-fluorures, comme l'avait supposé Daubrée pour les filons du Saint-Gothard³) : par conséquent, dans des conditions toutes différentes de celles qu'avaient mises en relief les ségrégations de fer titané et rappelant la formation de la cassitérite. Il est à remarquer que cette cristallisation du titane à l'état d'oxydes ou de sphène paraît correspondre à une réaction moins profonde que celle précédemment étudiée : à un commencement de départ, qui s'accuse dans des régions à dislocations un peu plus récentes (calédoniennes, hercyniennes ou même, exceptionnellement, alpestres).

ZIRCONIUM

Zr = 90,6.

Usages et prix. — La zircone est très réfractaire, et, chauffée, elle émet une lumière extrêmement brillante. Ces propriétés, signalées par

¹ Dans le Tyrol, A. de Lapparent a expliqué le développement du sphène par un emprunt au rutile des schistes dans les phénomènes métamorphiques.

² Voir plus haut, tome 1, page 652.

³ 1879. *Géologie expérimentale*, p. 41.

Berzelius dès 1825, ont fait l'objet des premières recherches d'Auer sur l'incandescence et l'on a proposé diverses formules à base de zircon pour la fabrication des manchons, ou encore essayé de déposer du zirconium sur les filaments de charbon destinés aux lampes électriques. Il en résulte un emploi dans les lampes Nernst (avec addition de thorium et d'yttrium), et dans les lampes à filaments de zircon.

La zircon donne, avec l'alizarine, des couleurs comparables aux jaunes de chrome. Enfin les beaux cristaux de zircon constituent, en outre, une gemme de valeur restreinte.

Le prix du zircon, obtenu comme sous-produit des exploitations de monazite, est de 2 à 3 fr. le kg. Le zirconium industriel vaut à Paris, au détail (1911) : 0,90 fr. le gr.

Rôle géologique. — En chimie, Moissan a comparé le zirconium au silicium, au titane, au germanium et à l'étain, comme donnant des bioxydes cristallisés dans des conditions probablement analogues et ayant diverses propriétés semblables. Les anhydrides silicique, zirconique, etc., se dissolvent de même dans l'acide phosphorique en donnant des pyrophosphates cristallisés. Les combinaisons des acides oxygénés avec les métaux fournissent des composés comparables.

Géologiquement, on trouve peu le zirconium à l'état d'oxyde (*zircon*) comparable au quartz, au rutile ou à la cassitérite, mais presque toujours à l'état de silicate simple ou complexe ou de titanate, souvent avec association de niobium et de tantale : ce qui le sépare de l'étain ou, plus généralement, des métaux localisés en filons, pour le rapprocher, au contraire, du thorium et des métaux rares, avec lesquels il est très fréquemment associé.

Le minerai ordinaire du zirconium est le *zircon*, $ZrO_2 \cdot SiO_2$. C'est un minerai très fréquent en inclusions microscopiques dans une foule de roches : telles que les granites, syénites ou schistes cristallins. On l'y trouve, d'ordinaire, englobé dans les micas ou chlorites, parfois dans les amphiboles ou pyroxènes. Ses cristaux visibles à l'œil nu se sont développés en des points plus rares dans les mêmes roches : granulite ou pegmatite des Pyrénées, de la Haute-Loire, de Saxe ; granites de l'île d'Elbe et du Tyrol ; trachytes du Cantal et du Siebengebirge ; gneiss de Norvège, de l'Oural ; micaschistes etc.. Mais ses gisements les plus riches sont dans les syénites néphéliniques, dites zirconiennes, de Norvège (Brevig, etc.), de Suède, du Groënland, des monts Ilmen, du Colorado, de la Caroline.

Il existe, de plus, une variété de zircon, la *cyrtolite* et un zircon hydraté, à 3 p. 100 d'eau, le *malacon*.

Gisements. — Le groupe des *monts Ilmen*¹ comprend, nous l'avons vu, un grand nombre de gisements situés entre le lac Ilmen qui est à 2 km. N. E. de Miass et le lac de Miass, qui est environ 12 km. plus loin, dans la syénite néphélinique ou surtout dans les roches qui en dérivent, formant des filons à travers le gneiss encaissant. Le zircon s'y trouve

¹ L. DE LAUNAY. *Rich. min. de l'Asie*, p. 577. — Voir plus haut, tome 1, p. 841.

avec le corindon, le béryl, la tourmaline, la topaze et le fer titané. Certains filons de syénite micacée constituent de véritables mines de zircon, avec de la monazite, de la samarskite, de la columbite, etc. On y a trouvé des cristaux volumineux de zircon, dont l'un a atteint 3.580 gr.

Dans la *Caroline du Nord*, le zircon est exploité dans les alluvions qui fournissent aussi la monazite près de Green River (Henderson County)¹.

On exploite également une variété de zircon, la cyrtolite, à Baringer Hill, comté de Llano (*Texas*).

Pratiquement on recueille, en outre, beaucoup de zircon dans les alluvions (Ceylan, Brésil, etc.).

¹ BASHERVILLE. *Zirconium* (Mineral industry for 1908, p. 869).

TABLE SOMMAIRE DU TOME I¹

PREMIÈRE PARTIE

Principes généraux de Métallogénie.

CH. I. — <i>Problèmes préliminaires de la métallogénie</i>	4
I. Objet de la métallogénie. Principales étapes de la concentration métallogénique (1); II. Structure comparée de la Terre et des astres (6); III. Notions sur les parties internes de la Terre (11); IV. Distribution primitive des éléments chimiques (12); V. Proportion relative des éléments chimiques dans les parties superficielles de la Terre (26).	
CH. II. — <i>Classification métallogénique des corps simples</i>	34
CH. III. — <i>Les lois générales de la métallogénie</i>	55
CH. IV. — <i>Gisements de formation primaire. Les réactions ignées en métallogénie</i>	73
A. Gites d'inclusions (74); B. Gites de ségrégation (78); C. Gites de départ immédiat ou de ségrégation périphérique sulfurée (83); D. Gites de contact du type Banat (85).	
CH. V. — <i>Imprégnations diffuses de profondeur. Veines interstratifiées. Fahlbandes. Amas pyriteux</i>	88
CH. VI. — <i>Gisements hydrothermaux. I. Disposition du vide rempli</i>	105
CH. VII. — <i>Gisements hydrothermaux. II. Le remplissage</i>	125
CH. VIII. — <i>Conditions de dépôt des remplissages filoniens</i>	151
CH. IX. — <i>Transformations ultérieures des gites métallifères. Observations générales. I. Réactions de profondeur</i>	169
CH. X. — <i>II. Altérations en rapport avec la superficie actuelle. Métasomatoses</i>	179
CH. XI. — <i>Gisements détritiques. Grès et conglomérats métallifères. Alluvions. Placers</i>	208
CH. XII. — <i>Gisements de transport chimique. Evaporations salines. Gites sédimentaires et stratiformes</i>	223
CH. XIII. — <i>Conséquences générales</i>	241
A. Classement des métaux par types de gisements (241); B. Age des gites métallifères (242). C. Répartition géographique des gisements. Provinces métallogéniques et types régionaux (250); applications à l'Europe (254), à l'Asie (265), à l'Afrique (275).	

SECONDE PARTIE

Etude des divers éléments chimiques.

CH. XIV. — <i>Hydrogène, hélium, azote, oxygène, ozone</i>	289
CH. XV. — <i>Fluor, chlore, brome, iode</i>	305

¹ Les tables complètes et les divers index se trouvent à la fin du tome 3.

CH. XVI. — <i>Soufre, sélénium, tellure</i>	318
A. Gisement de soufre natif (327); B. Pyrite de fer (344).	
CH. XVII. — <i>Carbone</i>	368
A. Graphite (373); B. Diamant (399); C. Composés hydrocarbonés (439):	
I. Combustibles minéraux, jais et ambre (444); II. Schistes bitumineux (454); III. Pétrole (470); IV. Ozocérite (595); V. Bitume (598); VI. Calcaire asphaltique (605); VII. Gaz naturels (616).	
CH. XVIII. — <i>Bore</i>	621
CH. XIX. — <i>Phosphore</i>	634
CH. XX. — <i>Vanadium</i>	719
CH. XXI. — <i>Arsenic</i>	730
CH. XXII. — <i>Antimoine</i>	738
CH. XXIII. — <i>Bismuth</i>	776
CH. XXIV. — <i>Molybdène</i>	783
CH. XXV. — <i>Silicium et silicates divers</i> (quartz, feldspath. argiles, kaolin, ardoises, mica, amiante, pierres précieuses, etc.)	789
CH. XXVI. — <i>Titane, zirconium</i>	843