DU MÊME AUTEUR

Les mines d'or du Transvaal, 1896 (Ch. Béranger).
Les diamants du Cap, 1897 (Ch. Béranger).
Les sources thermo-minérales, 1899 (Ch. Béranger).
Les richesses minérales de l'Afrique, 1903 (Ch. Béranger).
La géologie et les richesses minérales de l'Asie, 1911 (Ch. Béranger).
Traité de métallogénie, gîtes minéraux et métallifères, 3 vol., 1913 (Ch. Béranger).
La technique industrielle, 1930 (Ch. Béranger).

Formation des gîtes métallifères (Gauthier-Villars), 1905.
La science géologique (Armand Colin), 1905.
L'or dans le monde (Armand Colin), 1907.
Géologie pratique (Armand Colin), 1909.
Histoire de la terre (Flammarion), 1907.
La conquête minérale (Flammarion), 1908.
Où en est la géologie ? (Gauthier-Villars), 1921.
Géologie de la France (Armand Colin), 1921.
Géologie et minéralogie à l'usage des ingénieurs (Baillière), 1922.
La Terre (Payot), 1924.
La vie des montagnes (Fayard), 1926.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

très respectueux ho

L. DE LAUNAY
de l'Académie des Sciences

48 inch

COURS
DE
GÉOLOGIE APPLIQUÉE

PROFESSÉ
A L'ÉCOLE SUPÉRIEURE DES MINES

Notes prises et rédigées

PAR

Henri VINCIENNE
Chef de travaux pratiques à l'École Supérieure des Mines

8°Geol.
H. 26595
F.L. 132
DON

PARIS ET LIÉGE
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE CH. BÉRANGER
PARIS, 15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
LIÉGE, 1, QUAI DE LA GRANDE-BRETAGNE, 1

1933

Tous droits réservés

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

COURS
DE
GÉOLOGIE APPLIQUÉE [1]

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

Objet de la géologie appliquée. — Le domaine de la Géologie appliquée est extrêmement vaste et nous pourrions faire entrer dans ce cours toutes les applications de la Géologie. Celle-ci guide, par exemple, l'Ingénieur des Ponts et Chaussées dans le choix des matériaux d'empierrement et de construction, dans le creusement des tranchées, dans la détermination des emplacements de ponts ; elle aide l'officier d'artillerie dans l'étude du modelé du terrain dont elle est un facteur très important et, par conséquent, dans la détermination des points stratégiques ; elle a des rapports très étroits avec l'agriculture et trouve son utilisation dans l'étude des sols, etc... Nous n'envisagerons pas ces applications multiples et nous nous limiterons à la *recherches des matières minérales utiles*, solides, liquides uo gazeuses, en laissant de côté les combustibles minéraux solides dont l'étude est faite dans le Cours de Géologie Générale. Toutes ces substances utiles se trouvent dans le sol ; il nous faudra connaître *leurs conditions de gisement*, afin de les rechercher avec plus de sûreté et d'orienter rationnellement la prospection lorsque des indices auront décelé leur présence.

La notion de minerai. — Notre définition de la notion de minerai sera différente de celle qu'on donne en minéralogie et ce sera d'une façon tout à fait exceptionnelle que nous aurons l'occasion de voir des espèces minérales bien définies, avec des formes minéralogiques nettes.

Pour nous, par exemple, un minerai d'or n'est pas un cristal d'or ou de tellurure d'or et ne montre généralement pas d'or visible ; le minerai d'or pratique, ce sera de la pyrite de fer contenant des traces d'or (8 à 10 gr. en moyenne ; parfois, dans des minerais très riches, 25 grammes à la tonne). Il en est de même pour le cuivre : les minerais de cuivre exploités dans

(1) Cet ouvrage, dû au bienveillant concours de M. Vincienne, doit être pris pour ce qu'il est : c'est-à-dire pour la fixation d'un enseignement oral, excluant toute préoccupation de style et toute bibliographie, avec figures schématisées. Les détails sont à chercher dans mon *Traité de Métallogénie* en 3 volumes. J'ai cependant profité de l'occasion pour remettre au courant les statistiques et les compléter plus que des leçons orales ne le comportent.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

la plupart des grandes mines ont des teneurs moyennes de 1, 5 à 2 % au lieu des teneurs de 30 à 60 % que présentent des minéraux de cuivre isolés. Le platine se trouve en petits grains dans des sables à basse teneur. Même pour des métaux très répandus comme le fer, la teneur la plus commune des minerais exploités est d'environ 35 %.

Le minerai ne sera donc pas caractérisé par ses caractères minéralogiques, mais par son exploitabilité, elle-même fonction de la teneur. Il se définira par son caractère « payant ». Ce sera une *substance qu'on a avantage à exploiter.*

Relativité de cette notion de minerai. — Ce caractère d'exploitabilité d'un minerai, par lequel nous l'avons défini, est essentiellement variable selon le temps, le lieu et les circonstances.

D'abord le prix des métaux est sujet à variations. Même la valeur de l'or, cependant réputée fixe, peut changer : depuis la guerre, elle a baissé un moment de 1/6 à 1/5. Ensuite les frais divers qui entrent dans le calcul du prix de revient d'un minerai varient constamment : le coût de la main-d'œuvre, les frais d'exploitation changent avec les pays et avec les époques ; les matières premières, utilisées dans l'exploitation des mines, sont elles-mêmes fonctions de facteurs très divers et d'un prix très variable ; les impôts grossissent généralement peu à peu ; les frais de transport dépendent de l'état des voies de communication dans le pays où a lieu l'exploitation et de la distance de ce lieu aux lieux de traitement ou d'embarquement. Il découle de là qu'une même substance peut être exploitable à un endroit ou à un moment donné et ne pas l'être ailleurs ou à une époque différente.

D'autre part, les perfectionnements apportés à l'outillage d'extraction et aux procédés de traitement influent sur les conditions d'exploitabilité. Ainsi le procédé de traitement des minerais d'or par la cyanuration, découvert en 1889, a permis d'exploiter des substances qui, auparavant, étaient tout à fait inutilisables ; les mines du Transvaal, découvertes à la même date, ont pu être mises en valeur grâce à ce procédé. Ce sont également ces mêmes procédés qui, entre 1890 et 1910, ont permis de reprendre l'exploitation de petites mines d'or abandonnées depuis longtemps, en Espagne, en France et en Angleterre. Ainsi, par la découverte de la cyanuration, on a pu classer dans la catégorie « minerais » des substances considérées auparavant comme stériles.

La *teneur limite*, c'est-à-dire la teneur au-dessous de laquelle il n'est pas possible d'exploiter dans des conditions économiques et avec bénéfice, est essentiellement variable. Au Transvaal où les substances aurifères accusent des teneurs allant de 0 à 40 grammes à la tonne, la teneur limite se place dans les conditions actuelles vers 8 à 10 grammes. Mais que le prix de l'or vienne à augmenter par rapport au cours de la livre sterling, toute une catégorie de teneurs, par exemple entre 6 et 8 grammes à la tonne, passera dans la catégorie des minerais. Inversement, que les impôts ou le prix de la main-d'œuvre augmentent, la teneur limite s'élèvera et toute une tranche de minerais exploités la veille passera dans la catégorie « stériles ». — *La notion de minerai varie donc avec les circonstances économiques et sociales.*

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

La teneur limite est subordonnée, pour un même métal, à la nature du gisement et, pour une même nature de gisement, aux conditions industrielles d'exploitation. Elle diffère selon qu'il s'agit des minerais aurifères du Witwatersrand, de ceux du Dakota ou de l'Alaska, ou des alluvions aurifères qui n'exigent, pour être exploitées hydrauliquement, qu'une teneur de quelques sous d'or à la tonne.

En outre, plus une mine se développe et devient riche, plus la teneur limite des minerais qu'elle exploite s'abaisse. Au Transvaal, selon qu'une mine est prospère ou non, le Main Reef, dont la teneur est très voisine de la teneur limite, est considéré comme utilisable ou non. La teneur limite du minerai exploité se trouve être ainsi fonction inverse des qualités de l'ingénieur qui dirige l'exploitation. C'est cet abaissement de la teneur limite qui, en provoquant la mise en exploitation de parties considérées jusqu'alors comme inexploitables, explique que la teneur moyenne des minerais extraits d'une mine riche, prospère, diminuant ses prix de revient, puisse s'abaisser avec le temps, sans qu'il y ait en réalité diminution de la teneur avec la profondeur.

En dernière analyse, *notre définition du minerai sera un fait économique et non minéralogique.*

Les concentrations anormales. — Toutes choses égales, l'exploitation d'un minerai dépend de la concentration du métal. Nous sommes amenés à rechercher les points où la concentration du métal ou du minéral est plus forte qu'ailleurs. La géologie appliquée sera donc aussi *l'étude des concentrations anormales à la surface du globe.*

La valeur d'un gisement. — La question de la valeur d'un gisement est très complexe. Elle peut se poser pour une mine déjà exploitée ou pour une mine nouvelle. Le problème est presque le même dans les deux cas, car un filon n'est pas constant et se trouve rarement seul. Le problème se pose même dans une mine en pleine activité. Il importe, dans une exploitation sagement conduite, d'éviter les à-coups de production. Quand on a des galeries de recherches déjà tracées et quand on a isolé des massifs minéralisés, on peut théoriquement se rendre compte de la richesse du gîte et diriger l'exploitation en conséquence.

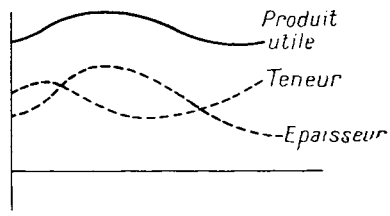


Fig. 1.

En effet, on peut tracer deux courbes donnant la teneur et l'épaisseur du gîte en chaque point d'une galerie. Le produit de ces deux données fait connaître la quantité de produit utile. On organise donc les chantiers de façon que la somme de ces produits utiles soit sensiblement constante. C'est ce qui indique l'importance primordiale des travaux de traçage dans un gisement métallifère.

Prises d'essai. — La question des prises d'essais a un intérêt tout particulier. La prise d'essai, pour être bien faite, doit donner une idée de la

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

teneur *moyenne* et elle doit être exécutée en conséquence. On doit donc éviter de prélever les échantillons uniquement dans les parties friables — qui sont en général les plus riches — ou, par réaction, uniquement dans les parties les plus dures.

Prospection d'une mine nouvelle. — Les mines se trouvent souvent dans des régions montagneuses. La plupart du temps, la découverte est due à des paysans, des chasseurs, et les premiers travaux d'exploration ou même d'exploitation rudimentaire sont faits par de petits capitalistes locaux. Généralement ces travaux, exécutés sans méthode et sans capitaux suffisants, n'aboutissent pas. De nouveaux travaux d'exploration sont ensuite entrepris par des compagnies plus importantes.

Dans certains cas, une mine ancienne exploitée pour un certain minerai est susceptible d'en fournir de nouveaux. On peut en citer de nombreux exemples. La mine de Fortuna en Sardaigne qui exploitait de la galène avait son puits foncé dans un massif de calamine, dont l'existence n'a été reconnue, bien plus tard, que fortuitement. Dans d'autre cas, on avait exploité de la pyrolusite en rejetant le carbonate de manganèse rosé comme stérile !

Les travaux de recherche doivent déterminer en premier lieu l'emplacement du filon. La manière la plus sûre de rencontrer un filon est de pratiquer un travers-bancs et non une galerie en direction. L'affleurement est particulièrement difficile à reconnaître, car le filon n'est ni rectiligne, ni continu ; de plus, l'affleurement peut être recouvert de parties non défrichées ou broussailleuses, ou encore d'éboulis. La reconnaissance s'effectue alors par tranchées transversales, et l'affleurement est déterminé approximativement par points ; on relève les puissances et les teneurs quand il y a lieu.

Ayant fait des tranchées, et, au besoin, des sondages préliminaires, on procède, s'il y a lieu, par descenderies. On a ainsi un aperçu de la longueur du filon et de la puissance minéralisée. Reste à déterminer la 3e dimension, c'est-à-dire la continuité suivant l'inclinaison. Dans ce sens, un filon n'est pas indéfini : un filon est, en effet, constitué par une fracture remplie de minerai et il n'y a pas de raison pour que cette fracture soit illimitée.

Mais cette considération serait sans importance pratique si la dimension du filon suivant le pendage était toujours de même ordre que sa longueur. En effet, les filons de 1 kilomètre 1 /2 de longueur sont fréquents ; si la minéralisation descendait jusqu'à une profondeur du même ordre, elle pourrait être considérée pratiquement comme indéfinie puisque les travaux d'exploitation ne peuvent guère descendre plus bas. Mais il n'en est pas toujours ainsi pour d'autres raisons. Il existe deux sortes de filons : les *vrais filons* ou fractures continues et profondes provenant de mouvements tectoniques et les *faux filons* ou fractures locales sans continuité provenant de glissements ou de mouvements locaux de terrains ; mais, même dans un vrai filon, le remplissage est limité. A la surface, il y a eu une partie, aujourd'hui disparue par érosion, où le minerai ne s'est pas déposé. De même en profondeur, il y a eu également, dès le début, une zone où le filon s'arrêtait. Dans certaines régions, ou plutôt dans certaines provinces minéralogiques, on connaît les limites approximatives de profondeur. En Espagne, par

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

exemple, la minéralisation des filons plombifères du Sud-Est ne dépasse guère une profondeur limite de 300 à 400 mètres.

La question des *frais d'exploration* est des plus importantes. On doit toujours prévoir des travaux d'exploration et de recherche importants de façon à ne pas être pris au dépourvu quand la partie superficielle est exploitée. On peut retrouver, en effet, des passes riches après des passes stériles : ce fait se traduit par le plan même des travaux d'un gîte filonien. Ainsi, dans les anciennes mines domaniales autrichiennes, on a pu retrouver des parties excellentes après avoir travaillé à perte pendant plus de 50 ans.

L'évaluation du *cube du minerai* exploitable est fort difficile ; on est forcé d'admettre la continuité entre les points bien connus, ce qui n'est pas toujours réalisé.

La question des *conditions de vente* demande l'étude des cours, la prévision des cours futurs et de l'amplitude probable des fluctuations.

La *main-d'œuvre* est un gros souci, surtout, quand il faut se procurer plusieurs milliers d'ouvriers dans une région peu peuplée : on peut être forcé de faire appel à la main-d'œuvre étrangère, comme au Transvaal ou dans l'Est de la France.

Inversement, les frais d'exploitation peuvent diminuer plus tard : par suite de l'établissement d'une nouvelle voie ferrée, par exemple. Au début d'une exploitation, on est en général porté à s'exagérer l'importance de cette diminution des frais quand l'entreprise sera en régime de production normale, et l'avenir ne justifie pas toujours cet optimisme.

Divisions du Cours. — Le cours sera divisé en 2 parties :

I. Nous étudierons d'abord les *gisements minéraux indépendamment de leur nature.* Nous verrons que les éléments chimiques ont dû se répartir à l'origine dans l'ordre de leurs poids atomiques, au sein de la sphère fluide ; puis des phénomènes, probablement des tourbillons gazeux ou des jets de matières montant de la profondeur, sont venus troubler cet ordre et produire par endroits des concentrations anormales de substances ; enfin, après consolidation de la croûte terrestre, toute une série de phénomènes géologiques, que nous chercherons à démêler, ont repris les concentrations à la surface du globe et ont produit les gisements actuels : ce sont les phénomènes ignés (refusion, ségrégation, montées de matières fluides) et les phénomènes aqueux (circulations d'eaux souterraines, remaniements, sédimentation avec concentration, altérations superficielles).

II. La seconde partie sera consacrée *à l'étude particulière de chaque substance minérale*, en suivant l'ordre de la classification métallogénique [1]. Pour chaque élément, nous rechercherons dans quelles conditions il se présente sur le globe et quelles en sont les différentes combinaisons utiles ; puis nous étudierons séparément chacune de ces combinaisons de la façon suivante :

a) Aperçu sur la demande et les consommations de cette matière. Il est logique de commencer par là : c'est la demande qui règle l'offre et souvent les syndicats d'exploitants ou de vendeurs réglementent la production d'après les prévisions de demande.

(1) Cet ordre, qui pourra surprendre, est motivé par des considérations théoriques exposées dans le *Traité de Métallogénie*, I, 39.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

b) Production de la substance, commerce (1), statistique, grandes régions productrices.

c) Classification et étude des gisements dans l'ordre suivant : Inclusions, Ségrégations, Imprégnations diffuses, Filons, Altérations, Gisements sédimentaires. Les gisements choisis comme types seront : soit les plus importants par leur rôle industriel ; soit les plus complètement connus, fussent-ils épuisés ; soit les plus intéressants pour un français par leur situation géographique.

Il ne sera pas mauvais d'étudier même des substances qui donnent lieu à de petites exploitations : ces substances ont leur intérêt en elles-mêmes et sont souvent plus rémunératrices. Elles peuvent prendre subitement une valeur inattendue. Ce fut le cas du *Thorium* et du *Zirconium* : les quelques gisements de monazite connus au moment de l'invention du bec Auer ne furent bientôt plus suffisants et les prix montèrent jusqu'à 1.000 francs le kilogramme ; puis, des prospections heureuses ayant amené la découverte d'énormes gisements de monazite, les prix s'abaissèrent à 3 francs et les anciens gisements furent abandonnés. Ce fut le cas aussi des métaux qui rentrent dans la métallurgie du fer : vanadium, tungstène, molybdène, etc..., des minerais du radium, comme la pechblende. Ce sera peut-être le cas du titane.

A la fin du Cours, nous étudierons *les eaux thermo-minérales.*

Outre leur intérêt pratique, les eaux thermo-minérales ont un puissant intérêt théorique : elle nous donnent l'explication de gisements considérables comme les filons métallifères. La source thermale est pour ainsi dire l'être vivant, le filon est comme une sorte de cadavre : l'étude des deux sujets se complète mutuellement.

(1) Nous appellerons toujours *francs-or* les véritables francs d'autrefois qui permettent seuls une comparaison avec l'avant-guerre et *francs réduits* les francs réduits au cinquième.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

PREMIÈRE PARTIE

GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE PREMIER

RÉPARTITION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES DANS L'ÉCORCE TERRESTRE

Les métaux et les substances utiles se trouvent en apparence pêle-mêle à la partie superficielle de l'écorce terrestre : il ne semble pas, au premier abord, y avoir d'ordre dans leur distribution. En réalité, la plupart d'entre eux représentent des éléments, venus de la profondeur, et sont, dans la zone superficielle, comme nous allons le voir, tout à fait exceptionnels.

1. Composition moyenne de l'écorce terrestre. — La zone terrestre qui est accessible à nos investigations et pour laquelle il paraît licite de prolonger sans modifications notables des résultats constatés ailleurs, ne forme qu'une mince pellicule superficielle d'une vingtaine de kilomètres au maximum. La composition moyenne y semble la même partout : elle comprend un très petit nombre de substances qui sont des silicates variant fort peu de l'un à l'autre. Cette composition moyenne a pu être déterminée par une commission américaine, en prenant la moyenne d'un très grand nombre d'analyses (10.000) exécutées sur des roches prélevées en tous les points du globe. Une 2e, une 3e série d'analyses, effectuées dans les mêmes conditions, ont donné des résultats à peu près concordants, à la 3e décimale près. On peut donc comparer ce travail à l'analyse d'une prise d'essai bien faite. On a trouvé :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Silice	60 %	soit les 3/4
Alumine	15,5 »	
Sesquioxyde de fer	2,7 »	
Protoxyde de fer	3,4 »	
Chaux	4,8 »	
Magnésie	4,4 »	
Soude	3,6 »	
Potasse	2,8 »	
Eau (persistant à 100°)	1,0 »	

L'analyse rapportée aux éléments simples à donné :

Oxygène	47,1	99 %
Silicium	27,9	
Aluminium	8,1	
Fer	4,7	
Calcium	3,5	
Sodium	2,7	
Magnésium	2,6	
Potassium	2,4	

De ces chiffres il ressort que l'oxyygène forme environ la moitié de l'écorce terrestre : résultat encore plus exact si on tient compte de l'atmosphère et des mers. Plus de 1/4 est formé par le silicium. Il reste moins de 1/4 pour tous les autres corps chimiques, dont environ 8 % d'aluminium et 5 % de fer. *L'écorce terrestre est donc un silicate d'alumine combiné à diverses bases* (Fe, Ca, Na, Mg, K).

Les substances étrangères comptent seulement pour 1 % environ, Nous en citons quelques-unes :

Titane	0,3	1/2 %
Hydrogène	0,2	
Chlore	0,17	
Carbone	0,10	
Phosphore	0,10	
Manganèse	0,07	
Soufre	0,06	
Baryum	0,03	
Chrome	0,01	
Zirconium	0,01	
Nickel	0,005	

En outre, quelques métaux entrent pour des proportions infimes comprises entre 0,005 et 0,0001 % (Etain, Cobalt, Arsenic). Les autres, dont pourtant certains sont très usuels, n'existent qu'en quantités à peine dosables : Pb, Zn, Cu... Dans l'ensemble, *les métaux proprement dits occupent donc une place assez faible* dans l'écorce terrestre surtout si on met à part l'aluminium et le fer. Comment y sont-ils venus ?

2. **Distribution primitive des éléments.** — Partant de la périphérie pour gagner le centre de la terre ; nous rencontrons successivement plusieurs zones :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

1° L'atmosphère ;
2° La zone superficielle surtout constituée par les eaux (mers, etc...) et les organismes vivants ;
3° La zone rocheuse silicatée de l'écorce terrestre ;
4° La zone profonde de nature inconnue.

Nous pouvons établir, par la métallogénie et la géologie, une liste des éléments chimiques qui dominent dans chacune de ces zones et qui peuvent être considérés comme les chefs de files, les types des familles complexes.

Atmosphère. — Dans une zone tout à fait externe de l'atmosphère, doivent dominer l'*hydrogène* et l'*hélium*. Nous assistons à une fuite continuelle de ces deux éléments légers vers l'espace. Puis, dans la haute atmosphère, l'azote paraît exister presque exclusivement à l'état solidifié. Quand on se rapproche de la terre, on trouve les trois éléments bien connus : l'azote avec les gaz inertes de la même famille (argon, krypton, xénon, néon), l'oxygène et l'acide carbonique. *L'azote* y domine encore fortement (les 4/5 en poids). *L'oxygène* semble avoir sa place originelle à la partie inférieure de l'atmosphère et il est, dans l'écorce silicatée, un élément superficiel arrivé par le dehors, dont la proportion diminue quand on s'enfonce, pour disparaître finalement. De même l'acide carbonique se situe à la base de l'enveloppe atmosphérique. La place originelle du *carbone* est assez douteuse ; toutefois, il y a bien des raisons pour la placer dans la même zone approximative que l'oxygène, le carbone étant l'élément fondamental de la vie organisée, localisée à la surface de la terre. Donc, de haut en bas, les éléments se répartissent ainsi dans l'atmosphère :

Hydrogène (1), *Hélium* (4).
Azote (14).
Carbone (12), *Oxygène* (16).

Eaux et organismes. — Les eaux, les mers, les organismes vivant à la périphérie de l'écorce terrestre, sont formés par la combinaison des mêmes éléments empruntés à l'atmosphère : carbone, hydrogène, oxygène et azote.

Écorce silicatée. — Dans l'écorce silicatée, les éléments chimiques semblent être originellement répartis de haut en bas de la façon suivante :

D'abord : *Sodium* (23), *Magnésium* (24), *Aluminium* (27), *Silicium* (28).
Puis, plus profondément, dans la zone des ségrégations basiques :
Fer (56), *Manganèse* (54), *Chrome* (52), *Titane* (48), *Vanadium* (51).
Plus bas encore, dans les roches basiques :
Nickel (59), *Cobalt* (59), *Cuivre* (64) etc.

Il suffit de considérer les poids atomiques de ces différents éléments (mis entre parenthèses) pour constater que ces éléments sont en même temps *classés dans l'ordre des poids atomiques croissants* ; il y a là une loi qui correspond à la loi de gravitation universelle.

Zone profonde. — Sur la zone profonde, on n'a pas de renseignements précis. Mais il est facile de remarquer que, dans les zones précédentes, les éléments à poids atomiques élevés sont les plus rares et qu'ils ont des affinités chimiques faibles. On peut en déduire que ces métaux lourds

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

sont restés en profondeur et qu'ils ont monté difficilement vers la surface, par suite de leurs faibles affinités pour les minéralisateurs. Plus un métal a un poids atomique élevé, plus il est rare dans les zones superficielles et plus son extraction est faible : plus profondément doit être sa situation originelle dans le globe (Or, Platine, Radium). Enfin, les métaux lourds sont toujours associés aux roches basiques, plus lourdes. Il est donc probable que, même dans cette zone profonde de nature inconnue, les éléments se sont distribués de haut en bas dans l'ordre de leurs poids atomiques croissants.

On peut arriver aux mêmes résultats en observant que la densité de la terre, déterminée par de nombreuses méthodes concordantes, est de 5,56. Or, la densité de l'eau de mer est voisine de 1 ; celle des roches que nous observons de 2,5. Force est d'admettre une plus grande densité pour la masse interne et d'y situer les éléments lourds.

Certaines observations d'ordre astronomique viennent à l'appui de ces différentes hypothèses. A la partie superficielle des astres, se manifeste la tendance, 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 : les astres s'appauvrissent peu à peu en éléments légers, en fuite vers l'espace. L'analyse spectrale nous a montré à la périphérie du globe solaire une enveloppe d'éléments légers comme l'hydrogène et l'hélium.

D'autre part, une disposition analogue à la distribution des éléments par ordre de poids atomiques nous est fournie par la répartition des planètes autour du soleil, dans l'ordre de leur densité planétaire.

En dernière analyse, il est probable que tous les éléments chimiques sont des aspects d'une même substance dont les atomes ont pris des formes différentes selon leur position par rapport au centre de la Terre, position qui conditionnait leur condensation. De là cette sorte de phénomène de « dépaysement » qu'on remarque dans un élément qui n'est plus à sa place originelle : c'est ce phénomène qui se traduit pour le radium par sa transformation en hélium (1).

3. Les premières concentrations métallifères de la phase cosmique. — L'expérience montre qu'il y a eu un certain trouble dans la distribution primitive des éléments par ordre de poids atomiques croissants. Qu'est-ce qui a produit ce trouble ?

A la surface du soleil, on observe des mouvements tourbillonnaires, des éruptions de vapeurs métalliques, montant du centre vers la périphérie et avec lesquelles les taches solaires doivent être en rapport. A la surface de la terre, des phénomènes semblables ont pu, dans la masse encore en fusion, transporter des substances, primitivement profondes, vers la périphérie et rendre l'enveloppe extérieure hétérogène. Ces *bouffées métalliques* expliquent la localisation très nette, en quelques points du globe seulement, de métaux très lourds, originellement situés à de très grandes profondeurs. Ainsi le mercure n'est guère connu avec abondance qu'en 3 ou

(1) Voir le développement de ces idées dans les *Comptes Rendus de l'Ac. des Sc.* des 20 et 27 décembre 1926 et dans la *Revue des Deux-Mondes* des 15 avril et 15 mai 1927.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

4 points, dont un (région d'Almaden) a fourni au moins la moitié du mercure du globe. De même, le platine est nettement localisé en deux points (Oural et Transvaal), auxquels il faut ajouter 2 ou 3 autres centres secondaires. Le radium est concentré dans quelques régions (Joachimsthal, Afrique Centrale). Tous ces métaux, rassemblés sur quelques rares points du globe, sont des métaux lourds, à poids atomique très élevé, qui sont venus très difficilement et rarement vers la surface.

Il convient d'ajouter que, pour certaines substances comme le diamant, également concentrées en de rares points de l'écorce terrestre, la localisation s'explique tout différemment, par la réalisation très difficile et par suite exceptionnelle des conditions qui ont amené cette cristallisation du carbone.

4. Les phénomènes géologiques et les types de gisements. — Après cette première localisation pendant la période cosmique en rapport avec la montée de bouffées métalliques dans la masse terrestre en fusion, après la formation d'une pellicule solide silicatée à sa surface, nous entrons dans la série des phénomènes proprement géologiques. Ceux-ci se ramènent à deux types :

a) Phénomènes *ignés*, comme les montées de magmas, les refusions ;

b) Phénomènes *aqueux*, comme ceux qui ont permis le classement des éléments d'après leur degré de solubilité.

Ce sont tous des phénomènes *physico-chimiques*, dont certains ont réussi à donner de la mobilité aux éléments et ont facilité leur départ du magma originel.

Dans cet ensemble de phénomènes, intimement liés aux phénomènes tectoniques, une première phase profonde a permis, pour chaque étape de plissement, la séparation des scories lourdes basiques et des scories légères acides. Les réactions purement ignées de cette phase n'ont pas amené un départ accentué des éléments ; elles n'ont donné que des *gîtes d'inclusions*, où les minéraux utiles (Cassitérite) se présentent disséminés dans une roche ignée au même titre que les éléments constituants normaux de cette roche, et des *gîtes de ségrégations* (internes) dans lesquels une différenciation a concentré en amas au sein de la roche certains éléments utiles dont la nature varie avec la basicité ou l'acidité de cette roche.

Une autre phase plus voisine de la superficie se caractérise par le rôle des métalloïdes, auxquels on a pris l'habitude d'attribuer le nom de *minéralisateurs* (Chlore, Fluor, Soufre, Carbone, Bore, Phosphore). Ces corps, unis aux métaux, leur ont fourni de la mobilité et ont donné naissance à des fumerolles qui sont sorties de la roche mère. Ces fumerolles, ont pu rester à peu près anhydres, ne conservant alors qu'une mobilité restreinte ; dans ce cas elles ont formé : des *gîtes de ségrégations périphériques*, au contact de la roche mère et des terrains encaissants ; des *gîtes d'étain*, au voisinage de magmas très acides ; ou bien elles sont allées imprégner les terrains métamorphiques non loin de la roche initiale (*imprégnations diffuses*). Elles ont pu aussi se dissoudre dans des eaux chaudes, d'origine quelconque, qui ont déposé ensuite leurs éléments métalliques dans des fissures, parfois à de grandes distances, sous forme de *filons*.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Enfin, une étape très postérieure et tout à fait indépendante des précédentes est constituée *par l'action des eaux superficielles*, d'où résultent deux groupes de phénomènes :

a) Les uns *très importants* dus à une altération sur place superficielle ; une grande partie des gisements exploités ont été ainsi remaniés et concentrés par des *altérations superficielles* ;

b) Les autres accompagnés d'un déplacement et d'une condensation dans certains bassins de sédimentation : il s'est fait un classement des éléments transportés sous l'influence, soit de leur densité, soit de leur degré de solubilité. Ces derniers phénomènes constituent les *phénomènes sédimentaires.*

Tous les gisements métallifères dérivent plus ou moins directement de magmas éruptifs et il y a corrélation entre les types de roches et les types de métaux qui, leur sont associés ; mais, plus on se rapproche de la surface, plus, la séparation s'accentuant, la liaison du métal avec la roche devient hypothétique.

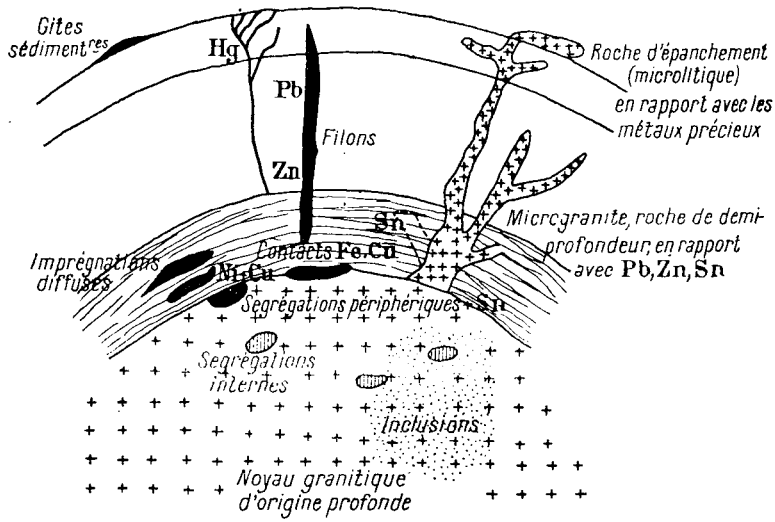


Fig. 2. — Schéma montrant la position des principaux types de gisements par rapport au noyau granitique.

Il y a en outre *une relation très nette entre les types de gisements rencontrés et l'âge des plissements* qui entraîne une profondeur d'érosion plus ou moins grande.

Dans les pays à plissements d'âge alpin, peu érodés et à terrains peu métamorphisés, ne comportant pas des fractures nettes, on observe surtout des filons très dispersés, souvent inconstants, donnant des résultats aléatoires. Les zones à manifestations volcaniques de la même période qui ne sont pas les zones plissées, peuvent au contraire présenter de beaux filons auro-argentifères ou mercuriels, comme dans l'Ouest Américain, le Japon, etc.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Dans les régions de plissements hercyniens comportant des roches dures comme les granites et les gneiss, nous rencontrerons les filons de plomb, de zinc, types plus profonds liés aux roches microgrenues, et même les filons d'étain encore plus profonds, associés à certains granites.

Enfin, dans les régions très anciennement consolidées où les couches profondes de l'écorce ont été mises à nu par l'érosion, les filons font d'ordinaire défaut et sont remplacés par les gîtes de ségrégations et d'imprégnations diffuses, avec le chrome, le nickel, le cuivre, les pyrites de fer ou mispickels parfois aurifères.

A chaque phase de plissements, des séries analogues ont pu se reproduire du haut en bas. Mais, comme l'érosion a exercé une action d'autant plus profonde que l'âge du plissement est plus ancien, il y a, entre l'âge des derniers plissements de consolidation dans une certaine zone terrestre et les types de gisements métalliques qu'on y rencontre, une relation du même genre que celle qui existe moyennement entre cet âge et les types pétrographiques. Les exceptions sont analogues ; c'est-à-dire que, s'il subsiste des roches de demi-profondeur dans un massif très ancien et, par conséquent, profondément érodé, leur présence peut entraîner celle de filons associés.

En résumé, la distribution des minerais à la surface du globe a comporté une première phase de localisation cosmique dont les règles nous échappent ; mais ensuite, dans la formation des gisements proprement dits, il est intervenu de véritables lois qui accusent les relations de ces minerais avec la profondeur d'érosion, donc avec l'âge des plissements et, par suite, avec la tectonique et la pétrographie. Il en résulte des *provinces métallogéniques* dont les types régionaux sont comparables entre eux et dont l'existence permet dans une certaine mesure à un prospecteur de savoir d'avance quels types il a chance ou non de rencontrer.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE II

PHÉNOMÈNES ACTUELS POUVANT SERVIR A EXPLIQUER LA FORMATION DES GITES MÉTALLIFÈRES

Un certain nombre de phénomènes actuels, se produisant avec ou sans l'intervention de l'homme, peuvent nous aider à comprendre la formation des gîtes métallifères. Ceux qui se manifestent sans l'intervention de l'homme se rapportent à deux grandes catégories :

1° *Des phénomènes réalisés à plus ou moins haute température et parfois sous une pression élevée.* — Tels sont les volcans (*fumerolles*) et les *sources thermales* ;

2° *Des phénomènes réalisés à la température et à la pression ordinaires.* — D'ordre chimique ou mécanique, ils aboutissent à la concentration de certains métaux, avec ou sans transport.

A ces deux catégories, nous en ajouterons une troisième, dans laquelle intervient l'homme : ce sont surtout les phénomènes de *métallurgie industrielle et de synthèse.*

A. — PHÉNOMÈNES RÉALISÉS A HAUTE TEMPÉRATURE

1. Volcans. — Les premier des phénomènes actuels à considérer est celui qui conduit à la formation des roches ignées. Mais celles que nous pouvons voir se former sous nos yeux en surface ne constituent qu'une petite partie des roches éruptives : ce sont les *roches volcaniques.* Les autres roches éruptives, de beaucoup les plus importantes, prennent naissance en profondeur en dehors de notre champ direct d'investigations actuel et sont seulement mises au jour par une érosion consécutive à laquelle nous avons déjà fait allusion.

Le mécanisme des phénomènes volcaniques comprend l'ouverture d'un orifice circulaire sur le trajet d'une fracture généralement peu visible, orifice par lequel sortent et sont projetées en l'air des laves pulvérisées (cendres), qui édifient peu à peu un cratère, et des coulées de laves. Ce phénomène est caractérisé par des explosions de vapeur d'eau.

Les laves ne forment pas à proprement parler de gîtes métallifères ;

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

elles sont exemptes de produits métalliques à l'exception d'un peu d'oligiste, de traces de cuivre et de plomb. Mais elles nous intéressent par les *fumerolles* qu'elles dégagent.

Ces fumerolles, dont l'étude est due principalement à Sainte-Claire Deville et à Fouqué, sont des produits volatils, probablement empruntés en partie à la fusion des roches profondes et à des réserves souterraines, mais pouvant aussi être enrichis par des pénétrations d'eaux superficielles avec matières salines. Elles se retrouvent les mêmes dans tous les volcans ; mais *leur nature varie avec la température de la lave*, soit qu'on examine celle-ci en un point plus éloigné de sa sortie, soit, en un même point, après qu'elle est restée plus longtemps à l'air, soit même dans une phase postérieure de l'éruption. Les modifications apportées à leur composition par l'abaissement de température sont surtout quantitatives. A haute température, tous les produits dont elles sont formées se dégagent d'abord tous ensemble ; puis, quand la lave se refroidit, ils s'épuisent et disparaissent successivement ; la vapeur d'eau prédomine dans tout le phénomène.

a) A très haute température, près de l'orifice du volcan, les fumerolles comprennent une abondance spéciale de *chlorures alcalins anhydres* (principalement chlorure de sodium ; puis chlorures de potassium, manganèse, fer, cuivre) avec traces de *fluor*, de chlorure d'ammonium, etc. Les chlorures alcalins continuent à se dégager jusqu'à 500° et, à partir de cette température, ils commencent à disparaître, laissant dominer le *chlorure d'ammonium*.

b) En même temps qu'ils disparaissent, la proportion *d'acide sulfureux*, quoique encore infime, devient plus sensible et croît graduellement à partir de 400°. Vers 300°, il n'y a plus de chlorures alcalins ; vers 100°, le chlorure d'ammonium lui-même a disparu et l'*hydrogène sulfuré* domine. Nous sommes alors en pleine période sulfurée qui se prolonge un peu au-dessous de 100°, tandis que l'acide carbonique tend de plus en plus à prédominer.

c) Au-dessous de 100°, l'hydrogène sulfuré disparaît à son tour progressivement et, de la lave presque refroidie, ne se dégagent plus que des *mofettes d'acide carbonique* provenant *d'hydrocarbures* brûlés. Ces mofettes durent très longtemps ; ainsi elles persistent encore dans certaines régions de volcans éteints de l'Auvergne.

En réalité, les fumerolles arrivent à l'air, pour la plupart, brûlées et oxydées. Ce fait est dû à l'action de l'oxygène de l'air. En profondeur, les gaz qui constituent les fumerolles sont surtout des gaz réducteurs dépouillés d'oxygène : c'est en approchant de la superficie qu'ils s'oxydent. Des prises d'essais, effectuées au Mauna-Loa (Iles Hawaï) de manière à prélever des gaz n'ayant pas subi le contact de l'air, n'ont pas montré de produits oxydés.

En résumé nous pouvons distinguer, dans les émissions de fumerolles, trois phases successives, très importantes pour la genèse des gîtes métallifères :

1° *Phase chloro-fluorée* (au-dessus de 400°) ;

2° *Phase sulfurée* (Entre 400° et 100°, les sulfures augmentent tandis que peu à peu disparaissent les chlorures) ;

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

3° *Phase carburée* (A partir de 100°, les carbures croissent, puis subsistent seuls).

Cette répartition se retrouve dans les gisements métallifères. En profondeur, au voisinage des roches éruptives originelles, se trouvent les minerais qui ont dû nécessiter l'intervention des métalloïdes de la famille du chlore et se former à une température relativement élevée ; par exemple la cassitérite (SnO^2) doit résulter de l'action du chlorure d'étain sur de la vapeur d'eau. Plus haut ou plus loin de la roche éruptive, viennent les sulfures (Pb, Zn, Fe...). Plus loin encore de la roche originelle, les carbures ont dû jouer un rôle important dans la formation des gisements où nous trouverons fréquemment des traces d'hydrocarbures et des gangues carbonatées.

Il y a donc une *relation entre la nature des fumerolles et la nature des minerais* ; de même on trouve une *relation entre le type de la roche ignée et le type du gîte métallifère associé.* Avec les roches de profondeur à structure granitique, caractéristiques des régions de plissements anciens et très érodés, nous rencontrons les gîtes d'étain qui correspondent à des fumerolles très chaudes. Avec les roches de demi-profondeur des régions moins érodées, seront associés des filons sulfurés : d'abord du cuivre, puis du zinc, du plomb et du mercure. Enfin, dans les régions peu érodées, les minerais d'allure filonienne seront en relation intime avec les manifestations de roches microlithiques (or, argent, mercure, etc.). Les deux termes extrêmes de la série métallifère seront représentés par l'*étain*, associé aux roches de profondeur acides, et le *mercure*, arrivé à l'état de sulfure soluble dans l'eau à peine tiède, et qui a précipité, très loin de son point d'origine, dans des fissures très minces ou sous l'action d'hydrocarbures. Ces considérations sont bien conformes à l'expérience, puisque le mercure est le seul métal proprement dit, qui soit encore apporté aujourd'hui par les eaux thermales.

Enfin, ajoutons qu'il peut y avoir passage graduel entre les trois stades fumerolliens ; par exemple, dans les gisements dus aux fumerolles chlorurées, il est possible de rencontrer déjà un peu de sulfures : notamment, du cuivre ou même du zinc dans un filon d'étain, etc.

2. Eaux thermales. — Le second phénomène actuel à considérer, ce sont les eaux thermales qui sont intervenues dans la plupart des gisements filoniens. Nous allons donc en dire dès à présent quelques mots, nous réservant de traiter le sujet plus spécialement à la fin du cours. En même temps, nous aborderons la question plus générale des eaux souterraines quelconques dont le mécanisme nous sera nécessaire à connaître pour expliquer les altérations des minerais.

Une source thermale est une source dont la température est supérieure à celle de la région où elle jaillit ; en outre, elle se caractérise par la manière dont l'eau sort : l'eau arrive par un mouvement vertical ascensionnel à son point d'émergence, généralement situé sur une fracture

Malgré l'existence de sources thermales abondantes dans les régions volcaniques, les sources thermales actuelles sont presque totalement le produit d'une circulation d'eaux provenant de la surface du sol, s'infiltrant *lentement* et remontant *brusquement* au jour après échauffement.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

a) Examinons d'abord le *cas de sources ordinaires.*

Imaginons un sol accidenté (fig. 3). Une partie des eaux météoriques s'infiltre dans le sol ; leur pénétration plus ou moins complète dépend non seulement de la nature du sol mais aussi du mode de précipitation (pluie, neige, etc.). L'eau pénètre par un réseau capillaire de petites fissures (*f*) et a tendance à s'enfoncer tant qu'il y a du vide devant elle.

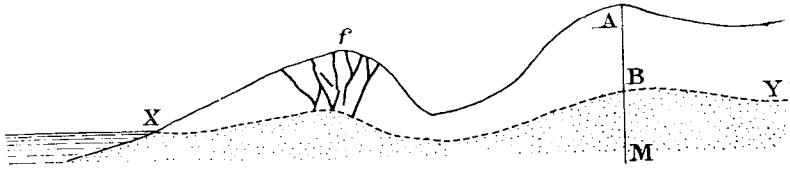


Fig. 3.

Elle descend jusqu'au point où l'eau est à l'état permanent, c'est-à-dire au-dessous de la *surface hydrostatique* XY. L'existence d'une telle surface n'implique pas la présence en profondeur d'une nappe d'eau continue ; l'eau emplit simplement les interstices du sol, les fissures qui se trouvent au-dessous du niveau hydrostatique. Si, en un point A, on fore un puits, l peut arriver qu'on ne rencontre l'eau dans le creusement qu'en un point M, beaucoup plus bas que ce niveau. ; mais, dès que ce point est atteint, l'eau ne tarde pas à s'élever dans le puits jusqu'à la surface hydrostatique en B, par suite de sa pression. Nous pouvons dire que *la surface hydrostatique ou piézométrique* est le lieu des points où l'eau s'établit dans tous les sondages, puits. etc.

La surface hydrostatique est une surface *essentiellement en mouvement.* dépendant de la rapidité avec laquelle se fait l'infiltration en tous les points d'une topographie plus ou moins accidentée et encore plus de la rapidité avec laquelle l'eau s'écoule au dehors. Ce n'est pas un plan. Elle épouse, en les atténuant, les accidents du relief topographique (fig. 3). D'autre part elle varie avec la saison ou l'époque considérée, tantôt un peu plus haute, tantôt un peu plus basse. Elle représente un état, non pas statique mais dynamique.

S'il n'y avait plus de précipitations atmosphériques, elle deviendrait, au bout d'un temps suffisamment long, une surface plane coïncidant avec le niveau de la mer. Si ces précipitations étaient diluviennes, elle pourrait arriver à se confondre avec la superficie.

La notion de surface hydrostatique a, non seulement une importance théorique, mais encore une valeur pratique du point de vue des gisements métalliques ; nous verrons que la nature et l'enrichissement d'un minerai dans un gisement diffère essentiellement selon qu'on considère ce gîte, au-dessous ou au-dessus du niveau hydrostatique. Au-dessus, les eaux se renouvellent constamment en entraînant des sels, de l'oxygène, de l'acide carbonique qui réagissent sur les minerais : ce sont des *eaux actives.* Au-dessous, elles sont permanentes et s'épurent en principes actifs, comme l'oxygène et l'acide carbonique : ce sont des *eaux inertes.* La variabilité de la surface hydrostatique entraîne fréquemment la persistance de mine-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

rais d'altération jusqu'à une certaine profondeur au-dessous du niveau piézométrique observé.

Les sources ordinaires peuvent jaillir à l'intersection de la surface hydrostatique XY avec la surface topographique, comme il arrive dans le fonds de certaines vallées très évoluées et très profondes. Mais la plu-

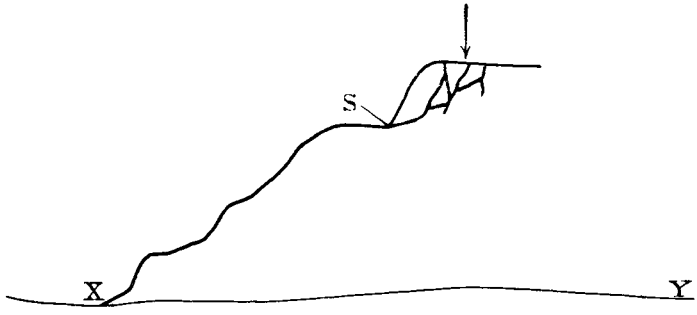


Fig. 4.

part du temps, elles résultent d'une circulation d'eau qui ne va pas jusqu'au niveau piézométrique, comme ces sources très précaires qui peuvent se produire en S après une grosse pluie d'orage (fig. 4).

Des sources du même genre peuvent exister au contact d'une couche perméable et d'une couche imperméable (argile, roche compacte etc.) : par exemple dans le fond d'une cuvette granitique, remplie d'arènes provenant de la décomposition de la roche.

Lorsqu'on a des alternances de couches perméables et imperméables, chaque niveau imperméable constitue une surface hydrostatique adven-

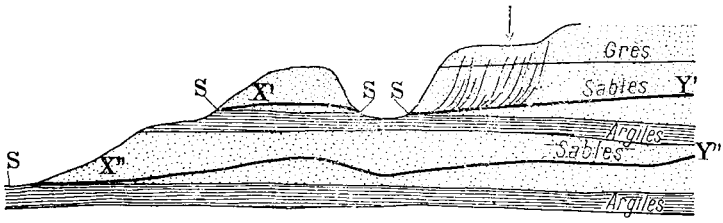


Fig. 5.

tive pouvant donner naissance à des sources ; dans ce cas, la notion de surface hydrostatique est plus complexe et se compose en réalité de plusieurs nappes superposées X'Y', X''Y'' (fig. 5).

b) *La source vauclusienne*, constitue un type intermédiaire entre les sources ordinaires et les sources thermales. Elle se rencontre dans les terrains calcaires, comme les Causses, région de hauts plateaux calcaires, coupés de quelques rares vallées très profondes (Tarn, Lot) (fig. 6).

Dans les calcaires, la circulation des eaux se fait par des cassures, des diaclases ; les eaux, dans cette circulation, élargissent les fissures par corrosion chimique et érosion mécanique. A la rencontre de bancs un peu

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

moins perméables, elles séjournent un certain temps et tendent à se rassembler et à creuser des cavités plus ou moins grandes : de là toute une série de cavernes souterraines (avens, puits, gouffres, grottes). Des orifices suspendus au flanc de la vallée, correspondant à des grottes allongées selon les plans de stratification (S', S''), marquent des stades anciens du creusement de la rivière.

Actuellement, les eaux descendent par une série de vides compliqués jusqu'au niveau hydrostatique XY ; puis elles tendent à s'écouler vers la vallée voisine. Mais, comme elles ne peuvent naturellement circuler que dans les fissures, cet écoulement se fait, non en droite ligne, mais par un

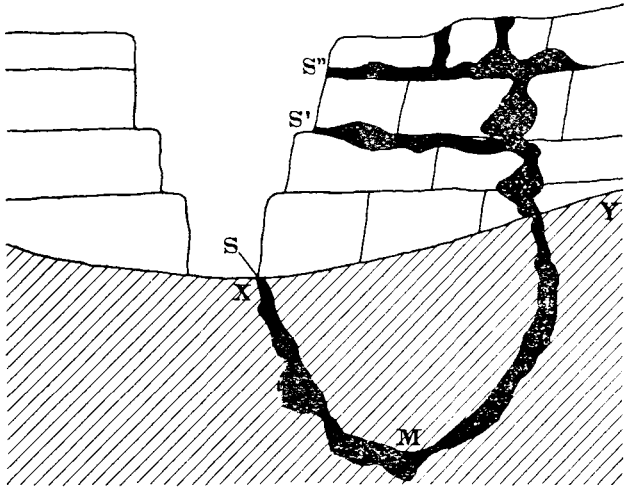


Fig. 6.

trajet compliqué tel que YMX, assimilable à une sorte de tuyau étanche. Comme les vides offerts par le calcaire sont souvent très larges, ce n'est pas un mince filet d'eau qui sort en S, ainsi que dans les sources ordinaires, mais un véritable cours d'eau. On se trouve en présence d'un gouffre, plus ou moins vertical, de diamètre considérable, d'où l'eau jaillit de la profondeur en charge, très abondante et avec une force très grande ; c'est le type de la source vauclusienne, ainsi nommé du nom de la Fontaine de Vaucluse. Un bon exemple en est fourni par la source de la Loue, dans le Doubs, résurgence qui remonte de 25 mètres environ.

c) Les sources vauclusiennes, dont le circuit souterrain ne descend pas à de grandes profondeurs au-dessous du niveau hydrostatique et dont la température de l'eau ne dépasse pas la température moyenne du lieu, nous conduisent aux *sources thermales*. Nous écartons, on le voit, la théorie développée par Suess, selon laquelle toutes les eaux thermales seraient des eaux juvéniles arrivant au jour pour la première fois : ce qui ne nous paraît au contraire correspondre qu'à quelques cas très particuliers.

Dans le cas d'une source thermale (fig. 7), il existe une large fissure *a b*

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

qui plonge dans le niveau hydrostatique et constitue un véritable tuyau mettant en communication un point *a* qui peut être situé à un ou deux kilomètres de profondeur avec un point *b* de la surface du sol.

Supposons que la différence d'altitude entre *a* et *b* soit de 2.000 mètres, l'eau provenant de *a* pourra atteindre 75°. Cette eau, ainsi échauffée, possède un pouvoir dissolvant assez fort et est capable d'agir sur les pyrites, sur les feldspaths, etc. contenus dans le sol ; elle se charge de minéraux.

Tandis que l'infiltration est nécessairement très lente, *la remontée de l'eau de a en b doit être très rapide.* Si elle se faisait en effet avec la même vitesse que l'infiltration, l'eau aurait le temps de se refroidir en remontant

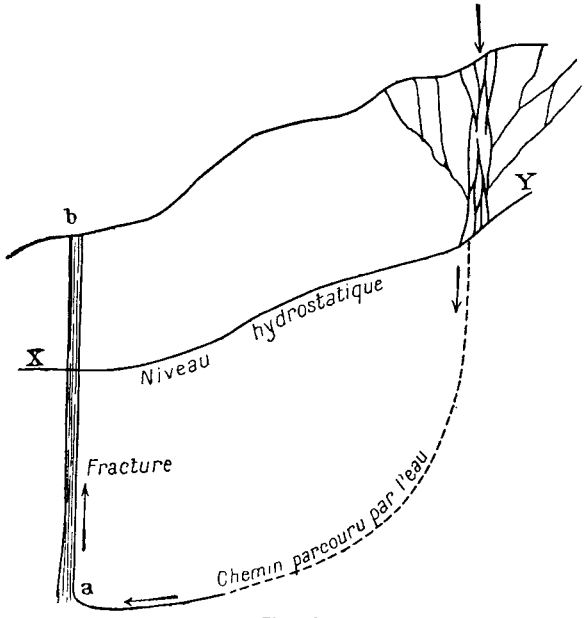


Fig. 7.

vers la surface et ne donnerait pas lieu à une source thermale. C'est grâce à un pli brusque, à une faille, à une cassure, à un filon, etc., que se fait la remontée rapide de l'eau chaude minéralisée. L'eau ne jaillit pas en n'importe quel point de la fracture, mais au point où la pression superficielle est la moins forte, comme nous le verrons mieux plus tard (1). On connaît de nombreuses sources thermales localisées *sur des failles.* La grande majorité sont *sur des filons. La durée de la remontée* de l'eau n'est jamais bien longue ; au plus quelques heures. Il est très facile de la calculer, d'après la température de l'eau, le degré donnant sa profondeur ; le débit et la section de l'orifice donnant sa vitesse (2).

Sommes-nous sûrs que les eaux thermales proviennent de l'infiltration lente des eaux météoriques ? Prenons pour exemple la source Pfäffers-

(1) Page 505.
(2) Voir page 514.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Ragatz en Suisse. On constate que le débit de la source est loin d'avoir la constance qu'on pensait autrefois ; il peut varier du simple au double et même au triple, comme c'est fréquent dans les sources dites alpestres. Il varie surtout avec la pluviosité de la saison. Il est très faible en hiver où les précipitations se font sous la forme de neige et très fort en été au moment où la fonte des neiges fournit à l'infiltration une grande abondance d'eau ; mais cette relation existe avec un certain décalage (2 mois 1/2 à 3 mois) ; la courbe de la pluviosité et celle du débit de la source se ressemblent, avec un intervalle constant. L'alimentation de la source paraît donc être liée aux eaux d'infiltration météoriques ; quant au décalage observé, il correspond au temps mis par ces eaux pour s'infiltrer depuis la surface jusqu'au niveau hydrostatique.

Des phénomènes de ce genre interviennent dans la formation de la plupart des gîtes métallifères.

REMARQUE. — Contrairement à ce qu'on affirme souvent, le *degré géothermique*, ou nombre de mètres dont il faut s'enfoncer pour avoir une élévation de température de un degré, est sujet à des variations dans un rapport de 1 à 4 ou 5. Elevé (100 mètres) dans les pays de consolidation très ancienne comme la région du Lac Supérieur, il est très faible (quelques mètres) dans les pays de volcanisme récent, comme la Toscane. Les sources thermales seront donc plus nombreuses dans les régions de volcanisme récent, où du reste les fractures n'ont pas encore eu le temps d'être incrustées, sans qu'il faille en conclure nécessairement une origine volcanique des eaux chaudes. *La quantité de sources thermales est extrêmement variable avec les régions.*

Dans les régions de plissements alpestres, on en rencontre beaucoup. Dans les régions hercyniennes, elles sont encore abondantes. Dans les plate-formes plus anciennes, il n'y en a pas ; quand il en existe quelques-unes, c'est qu'il s'y est produit des dislocations récentes.

Cette localisation des sources thermales est très intéressante au point de vue de la formation des gîtes métallifères ; elle indique que le moment où la source incrustante s'est produite et celui où la fracture s'est ouverte suivent de très près la phase de plissements : les deux phénomènes semblent être presque contemporains.

ÉLÉMENTS CHIMIQUES CONTENUS DANS LES EAUX. — Les *dépôts actuels de sources thermales* sont peu nombreux (calcite, aragonite, oxyde de fer ou de manganèse, plus rarement barytine, strontiane, carbonate de manganèse, orpiment, pyrite, cinabre) — et n'expliquent donc pas directement l'incrustation des filons métallifères. Mais il n'en est plus de même quand des métaux se sont trouvés fournis accidentellement aux eaux qui les ont alors déplacés et qui ont pu modifier leur forme de cristallisation antérieure, même à température relativement faible et sous la pression ordinaire. Ainsi, dans plusieurs sources thermales, déjà utilisées par les Romains et remises en exploitation entre 1850 et 1870 (Plombières, Bourbonne, Bourbon-l'Archambault), Daubrée a constaté l'existence de phénomènes chimiques qui s'étaient produits sur les matériaux anciens employés pour l'aménagement de la source ou sur des médailles de cuivre ou de plomb jetées dans l'eau.

Par action des sulfates alcalins, le cuivre des médailles s'était transformé

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en chalcosine, chalcopyrite, érubescite, cuivre gris, dioptase. Le plomb des tuyaux avait donné naissance à de l'anglésite, de la cérusite, de la galène. Par substitution sur des briques ou du béton, il s'était produit des zéolithes, de l'opale, de la fluorine, etc.

Donc même de petites quantités de substances, comme celles que renferment les sources thermales, sont capables de donner, au bout d'un temps assez long, des réactions sensibles.

De même, on a souvent observé des déplacements et recristallisations de minerais (galène, cinabre, etc.) dans des travaux de mine abandonnés, par le simple effet des eaux souterraines même non thermalisées.

L'analyse chimique des eaux thermales est également fort intéressante pour l'explication des filons. En fait, leur analyse a révélé qu'elles contiennent la presque totalité des corps chimiques reconnus dans les filons, au moins à l'état de traces. Il ne faut pas en conclure que les filons doivent leurs éléments, comme les sources actuelles, uniquement aux terrains traversés. Ceux-ci ont pu fournir autrefois comme aujourd'hui une partie des éléments. Toutefois la place insignifiante que tiennent les métaux (sauf le fer et la manganèse) dans les sources thermales actuelles oblige à admettre pour ceux-là une autre origine, habituellement plus profonde et fumerollienne.

En outre, il semble que les phénomènes actuels ne donnent qu'une faible idées des phénomènes anciens ; de même, que ce que nous voyons en surface ne donne qu'une faible idée de ce qui se passe en profondeur. L'eau qui sort au jour a des chances pour n'être qu'une eau tout à fait appauvrie et c'est un truisme de dire qu'elle ne peut pas apporter à la surface ce qu'elle a déposé en profondeur.

Enfin, toutes les périodes géologiques n'ont pas présenté une égale intensité. Dans les phénomènes hydrothermaux, comme dans les phénomènes volcaniques, se succèdent des époques d'activité et de calme. Nous semblons bien être aujourd'hui dans une période de calme alors que les périodes permotriasique ou oligocène paraissent avoir présenté des paroxysmes hydrothermaux.

B. — PHÉNOMÈNES DE SURFACE A LA TEMPÉRATURE ET A LA PRESSION ORDINAIRES

Cette catégorie renferme un certain nombre de *phénomènes aqueux* qui peuvent nous servir à comprendre les phénomènes sédimentaires anciens. Toutefois, il faut remarquer que, s'ils expliquent la formation de quelques gisements sédimentaires, ils sont loin de les expliquer tous ; par exemple, ils nous laissent ignorer comment se sont formés les dépôts de manganèse à allure sédimentaire.

Nous diviserons cet ensemble de phénomènes actuels en deux groupes bien distincts :

a) Ceux qui résultent d'une *précipitation chimique* ;

b) Ceux qui résultent d'une *précipitation mécanique.*

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

a) Phénomènes actuels de précipitation chimique

1. Dépôts d'évaporation saline. — Certains gisements doivent leur formation aux phénomènes d'évaporation saline qui se reproduisent sous nos yeux au sein de lagunes salées.

Evaporation normale de l'eau de mer. — Pour étudier l'ordre des phénomènes il suffit de faire évaporer de l'eau de mer qui est le type le plus banal de la dissolution saline. Supposons que cette eau de mer soit mise dans un bassin de 1 mètre de hauteur et laissons-là s'évaporer librement. Il y a concentration progressive de l'eau de mer, comme il arrive dans les mers soumises à une évaporation intense (mer Caspienne, mer Morte) ; et aucun dépôt ne s'effectue avant que la hauteur de la couche d'eau ne soit considérablement réduite. Il se précipite d'abord un faible produit, constitué par du *carbonate de chaux* avec *traces de strontiane* et du sesquioxyde de fer hydraté, qui ne donnent en aucun cas un véritable gisement. Quand la hauteur de l'eau n'est plus que de 0 m. 20, jusqu'à ce qu'elle soit de 0 m. 12, il se forme un abondant dépôt de *sulfate de calcium*. De 0 m. 12 à 0 m. 10, on observe un arrêt très net dans la précipitation. Puis, à partir de 0 m. 10, c'est du *chlorure de sodium* qui se dépose, d'abord pur, puis mélangé, quand l'épaisseur de l'eau n'est plus que de 0 m. 05, à des *sels magnésiens* (sulfate) qui lui communiquent une saveur amère. Ce dépôt de chlorure de sodium est de beaucoup le plus abondant. Enfin, quand l'eau est réduite à 0 m. 02, la *potasse* se précipite sous forme de *carnallite*.

Il reste alors un résidu d'eau, *l'eau-mère*, ayant la consistance d'un sirop, chargée encore de sels magnésiens et d'acide borique et qui, dans les conditions ordinaires de température et de pression, ne s'évapore pas.

En résumé, l'ordre des principaux dépôts est le suivant :

1° Gypse ;
2° Sel marin ;
3° Sel marin mélangé à des sels magnésiens et potassiques ;
4° Eau-mère.

Ce processus se retrouve dans l'industrie des marais salants et les paludiers profitent du temps d'arrêt entre la précipitation du gypse et celle du sel marin, pour faire passer dans un autre bassin l'eau de mer, déjà débarrassée du sulfate de calcium : ce qui leur permet d'obtenir un dépôt de sel marin libre de tout mélange gypseux.

D'après la succession théorique que nous venons d'indiquer, il peut exister du gypse seul dans un terrain ; mais la présence de sel marin implique toujours celle du gypse au-dessous, et, de même, sous la carnallite, on doit avoir nécessairement du sel marin puis du gypse. D'autre part, dans le sens-horizontal, les dépôts de gypse, qui se forment les premiers, sont plus fréquents et plus étendus que les dépôts de sel gemme, et ceux-ci beaucoup plus importants que les dépôts de potasse.

Evaporation d'un milieu salin complexe. — En réalité les phénomènes sont plus complexes que ne le laisse supposer cette théorie ; Van t'Hoff a montré que l'eau de mer met en présence une foule de sels, susceptibles de former à la température ordinaire des combinaisons diverses deux à deux, ou trois à trois : le nombre des produits réalisables est ainsi considé-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

rablement augmenté et leur ordre de précipitation compliqué. Les variations de température viennent encore modifier la nature des combinaisons possibles ; le facteur temps exerce aussi une influence énorme dont les réactions de laboratoire ne peuvent nous donner une idée. La pression intervient également quoique dans une mesure assez restreinte. Enfin, des réactions secondaires ont pu altérer certains sels après leur dépôt.

Ce sont tous ces phénomènes d'ordre physico-chimique qui expliquent, par exemple, que la précipitation du sulfate de calcium ait eu lieu, soit sous la forme hydratée (gypse), soit sous la forme anhydre (anhydrite, qui, par hydratation, peut redonner du gypse, avec augmentation de volume) ; ce sont ceux qui expliquent les intercalations, au milieu des gisements de sel gemme et de potasse, de lits d'anhydrite qui ont paru des dépôts revenant périodiquement et que les mineurs allemands ont appelés « anneaux d'un an ».

La géologie des gisements salins. — Une autre difficulté à laquelle on se heurte dans l'étude des gisements d'évaporation saline, c'est la *grande épaisseur* de certains dépôts de sel. Dans le sondage de Sperenberg, on est resté pendant 1.200 mètres dans le sel dont 5 à 600 mètres presque continus ; des épaisseurs de 2 à 300 mètres de sel à peu près continu sont fréquentes. Or, si l'on remarque qu'une couche d'eau de mer de 1 mètre d'épaisseur

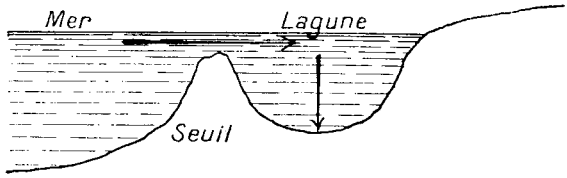


Fig. 8.

donne par évaporation une couche de sel d'environ 1 centimètre d'épaisseur, ces dépôts de 2 à 300 mètres de sel correspondraient à l'évaporation de couches d'eau de mer de 20 à 30 kilomètres. Il y a là à première vue une impossibilité que l'étude des phénomènes actuels nous permet de résoudre. Le sel de ces gisements semble s'expliquer par un afflux d'eaux salines provenant d'un réservoir plus vaste que celui où se fait la précipitation. Prenons l'exemple de la lagune de Kara Bogaz qui est séparée de la mer Caspienne par un détroit peu profond ne permettant la circulation que des eaux de surface (fig. 8). L'évaporation s'exerce sur la surface de la lagune ; l'eau de mer augmente de densité, se rassemble au fond de la lagune, tandis que le vide produit par l'évaporation est comblé par un afflux des eaux superficielles de la Caspienne. Il en résulte des phénomènes de concentration et de précipitation dans la lagune, dont les dépôts salins viennent d'un réservoir plus vaste qui est la Caspienne. Ce processus se reproduit chaque fois qu'une lagune communique avec une mer par un seuil surélevé, sous un climat qui favorise l'évaporation de l'eau. Quand aux *récurrences*, aux intercalations de lits salins d'un stade antérieur de précipitation au milieu des dépôts de sels, elles s'expliquent par les apports plus ou moins abondants d'eau douce fluviatile, apports qui peuvent varier avec les périodes ou les saisons. S'il y a afflux d'eau douce dans la lagune d'évapo-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

ration, il peut y avoir retour momentané à un stade antérieur de précipitation saline.

La *rareté des gisements de potasse* tient aux conditions très spéciales liées à leur formation et difficilement réalisées. Ces gisements s'accompagnent de dépôts de sels très divers comme des *borates* (borate de soude), des sels *magnésiens* plus ou moins complexes (chlorures doubles, sulfates doubles, etc.), dont certains résultent de réactions des sels de l'eau de mer les uns sur les autres ou même de réactions d'altération en surface postérieures aux dépôts des sels.

De même les gisements de *carbonate de sodium* proviennent de la réaction du sel marin sur d'autres carbonates comme le CO^3Ca qui constitue le sol des lagunes où ils se sont formés.

L'ensemble des phénomènes anciens qui ont constitué les gisements d'évaporation arrive donc, grâce à l'observation saline des phénomènes actuels, à une explication plausible.

2. Précipitation chimique du cuivre et du fer ; dépôts actuels de fer des marais. — A côté des dépôts que nous venons d'étudier, il s'en fait de plus rares et de plus précieux. Si une eau renferme, par exemple, en dissolution des sels de cuivre ou de fer, ces sels peuvent se précipiter, surtout si elle contient en même temps des substances réductrices (matières organiques). Ainsi se forment fréquemment, dans les vases marines littorales, des cristallisations de *pyrite de fer* provenant de la réduction des sulfates (gypse) en présence d'oxyde de fer. Ces dépôts de pyrites se produisent souvent autour de fossiles.

Les précipitations de *cuivre* sont plus rares et n'ont lieu que sur le littoral de régions cuprifères ; on en observe sur la côte de la province d'Huelva en Espagne. Le cuivre précipité provient du lessivage par les eaux courantes, des terrains cuprifères du district de Rio Tinto.

Certains gisements de *fer* s'expliquent peut-être par des phénomènes du même genre. Toutefois, il faut remarquer que peu de dépôts ferrugineux s'effectuent actuellement dans ces conditions. Nous ne citerons que les *dépôts de fer des lacs ou des marais.* Ce sont des dépôts de sesquioxyde de fer qui se forment sous une couche d'eau peu épaisse (au plus 10 mètres), dans les lacs, dans les étangs de régions plates, comme la Basse Lusace, la Silésie, la Pologne, le Banat, le Jutland, la Finlande, certaines provinces suédoises. On voit se déposer une boue séreuse, grise, noire, brune ou verdâtre, renfermant beaucoup de silice gélatineuse. En durcissant, ces ocres se concrétionnent souvent en petites boules ou en lentilles aplaties qui se groupent en amas ; des microorganismes (algues) interviennent probablement dans la précipitation du fer. Ces minerais lacustres atteignent rarement 0 m. 50 d'épaisseur, mais ils se renouvellent au fur et à mesure de leur exploitation. En réalité, ces gisements ferrugineux d'eau douce sont tout à fait rares dans les séries géologiques. Les oolithes ferrugineuses exploitées résultent de la précipitation du fer dans un bassin, non plus lacustre mais marin : ce fer, précipité à l'état de sidérose, aurait épigénisé les oolithes calcaires d'une couche à peine formée et la sidérose se serait transformée ensuite, d'abord en chlorite, puis en hématite.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

3. Précipitation chimique du manganèse. — Enfin, des concentrations de manganèse s'opèrent actuellement dans les profondeurs marines, au delà de 4.000 mètres, au milieu d'argile rouge produite par l'altération des produits volcaniques. Le manganèse s'y présente en *nodules* plus ou moins développés, allant depuis des grains microscopiques jusqu'à de grosses concrétions.

Ces concentrations manganésifères n'expliquent en rien les gisements de manganèse observés, tous d'origine sub-littorale et formés en eau peu profonde. Ici l'étude des phénomènes actuels ne nous est d'aucune utilité.

4. Rôle des organismes dans les phénomènes de précipitation chimique. — Les organismes jouent un rôle dans les phénomènes de précipitation chimique. Leur activité propre pendant leur vie, l'action chimique de leurs éléments après leur mort déterminent assez souvent des concentrations et des séparations de subtances. Ainsi les fossiles sont fréquemment des points de concentration de la silice et de la pyrite.

Les gisements de *phosphate de chaux* témoignent généralement. d'une sélection opérée par les organismes. Ceux-ci accumulent le phosphore dans leur squelette et dans leur chair et, après leur mort, peuvent le concentrer en des points déterminés, s'ils y sont suffisament nombreux. Les accumulations, en un même lieu, de poissons morts brusquement (par suite d'un changement brutal de température, de salinité...) peuvent être l'origine de gisements de phosphates de chaux. Les organismes inférieurs ont eux aussi la propriété de fixer le phosphore dans leur organisme : ils peuvent donc être également le point de départ de dépôts phosphatés.

b) Phémonènes actuels de précipitation mécanique

1. Dépôts d'alluvions. — Les dépôts d'alluvions obéissent à certaines lois qui aident à comprendre la formation des placers aurifères, des gisements alluviaux de platine, de cassitérite, de magnétite, de diamants, de saphirs, etc. Ces gisements correspondent à des phénomènes de préparation mécanique suivis d'une précipitation sous l'influence de la densité : les éléments lourds, métallifères et minéraux, qui accompagnent les alluvions, sont séparés dans l'eau par ordre de densité.

Distance à laquelle s'est faite la précipitation des éléments par rapport à leur point d'origine. — Les expériences de Fayol pour expliquer la formation du houiller de Commentry ont montré comment s'est opérée la préparation mécanique dont résulte la concentration des matériaux utiles. Fayol a pris des échantillons de toutes les roches de la région de Commentry, susceptibles d'avoir contribué au comblement du lac houiller, et il a étudié par des procédés mécaniques la façon dont elles s'usent l'une l'autre. Voici quels furent ses résultats.

D'abord les *micaschistes* disparurent très vite ; puis les *granulites*, dont les grands éléments feldspathiques sont l'objet d'une attaque relativement facile ; ensuite les *granites* ; enfin les *microgranites* qui résistèrent longtemps. En dernier lieu, seul subsistait du *quartz*.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Ces expériences ont permis d'expliquer l'abondance des galets quartzeux bien calibrés qui constituent exclusivement certains dépôts alluviaux (par exemple dans la région du Bourbonnais comprise entre la Loire et l'Allier, à la hauteur de Moulins). De même, elles contribuent à expliquer comment ont pu se rassembler les poudingues des gisements d'or du Witwatersrand, au Transvaal. La pyrite aurifère se rencontre là dans le ciment d'un poudingue composé de galets *uniquement* quartzeux, qui, dans un même banc, présentent, presque toujours, une grosseur analogue.

En outre, Fayol a étudié les alluvions d'une petite rivière de la région de Commentry, après la traversée d'un massif de schistes avec rares filons de granulite. A sa sortie du massif, les galets contenaient 70 % de schistes et 15 % de granulite ; à 2 kilomètres en aval, les schistes sont réduits à 30 %, et moitié plus petits ; au bout de 4 kilomètres, ils ont à peu près disparu. Le granite et la granulite s'usent également, plus lentement, en 12 ou 15 kilomètres ; le quartz seul persiste et finit par composer la majeure partie des alluvions. Donc, la constitution d'une alluvion, surtout si on considère les galets de quelque grosseur, est toujours en relation avec la nature du sol à très peu de distance en amont.

En même temps s'effectue un classement méthodique des éléments métalliques charriés par le cours d'eau : les minéraux les plus lourds étant déposés à une moindre distance que les éléments légers. Pour ces éléments métalliques, la distance à laquelle s'effectue le dépôt, à partir de leur point d'origine, est beaucoup plus réduite que pour les roches que nous venons d'étudier : elle est d'environ 4 kilomètres, au plus de 6 kilomètres. En s'éloignant du point de départ, on a des produits de plus en plus fins et bien classés.

Concentration des éléments utiles sur le Bed-Rock. — Il faut remarquer, d'autre part, dans les gisements alluvionnaires, la manière dont les éléments utiles se concentrent sur le soubassement rocheux ou bed-rock. L'or alluvionnaire repose d'ordinaire directement sur ce soubassement entamé par le cours d'eau, où les irrégularités du lit du torrent ont commencé à le retenir. Pourquoi cet or ne se trouve-t-il pas également réparti dans toute la masse alluviale, étant donné que les alluvions aurifères ont pu se produire pendant une très longue période ? Il semble qu'il y ait, dans ce fait, le résultat, d'un phénomène mécanique et chimique, de nature assez inexpliquée, de descente de l'or dans les alluvions ultérieurement à leur dépôt.

Les mêmes phénomènes de concentration de l'or sur le bed-rock se produisent aujourd'hui dans les placers et ont dû se réaliser dans la formation des placers géologiques. C'est surtout dans les périodes relativement récentes qu'on constate ces phénomènes alluvionnaires ; mais il n'y a là qu'une apparence qui tient au fait que les gisements d'alluvions ont d'autant moins de chance d'être conservés qu'ils sont plus anciens et que l'érosion eu plus le temps d'agir sur eux pour les détruire.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

C. — PHÉNOMÈNES QUI SE PRODUISENT AVEC L'INTERVENTION DE L'HOMME

1. Phénomènes de métallurgie industrielle. — Les opérations métallurgiques de nos usines ont permis d'expliquer comment ont pu s'effectuer les concentrations de 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. Elles ont permis de distinguer les facteurs suivants :

d'ordre physique : température, pression ;

d'ordre électro-chimique ou chimique : dissolutions, réactions mutuelles des éléments, précipitations.

2. Synthèses. — Pour expliquer le mode de formation d'un très grand nombre de minéraux en les reproduisant artificiellement, on a été obligé de faire intervenir des méthodes souvent très complexes. Si l'on veut tirer quelques conclusions géogéniques d'un phénomène de synthèse, il faut, non seulement que le cristal artificiel présente toutes les propriétés du cristal naturel, mais encore que la synthèse tienne compte des conditions naturelles et qu'elle réalise les groupements de minéraux qu'on trouve dans la nature.

Nous distinguerons quatre cas principaux suivant que les modifications moléculaires nécessaires à la cristallisation sont obtenues :

I — à l'état solide,
II — à l'état-fondu,
III — par volatilisation,
IV — en dissolution,

chaque cas pouvant à son tour se subdiviser suivant qu'on opère :

avec réaction chimique ou sans réaction,
à basse ou haute pression,
avec ou sans dissolvant.

I. *A l'état solide.* — Ce mode de cristallisation synthétique présente peu d'intérêt pour nous.

a) Les modifications moléculaires à l'état solide et *sans réaction chimique* (action lente du temps, phénomène vibratoire) interviennent dans la cristallisation de l'acide arsénieux, du fer, du soufre. Ainsi on sait que le système cristallin du soufre obtenu par voie ignée arrive à se transformer lentement, avec le temps pour reproduire le système obtenu directement par voie aqueuse.

b) Les mêmes modifications *avec réaction chimique* peuvent expliquer la reproduction du marbre par Hall.

II. *A l'état fondu.* — *a*) *Sans réaction chimique* et sans dissolvant, c'est-à-dire en laissant simplement refroidir le mélange fondu, on fait cristalliser le soufre, le bismuth, la stibine, le péridot, l'augite, la néphéline, la leucite, les plagioclases. La cristallisation de ces différents corps se fait dans l'ordre inverse de leur facilité de liquéfaction.

On peut aussi faire intervenir un dissolvant, comme le chlorure de sodium ou de calcium, qui permet parfois d'obtenir à haute température

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

la mobilité nécessaire. Ainsi le phosphate de chaux pur, à l'état fondu, ne donne pas de cristaux en se refroidissant ; mais, avec intervention de fluorures ou de chlorures, il donne des cristaux d'apatite. De même, le carbone dans la fonte cristallise, soit sour la forme de graphite, soit sous la forme de diamant.

b) *Avec réaction chimique*, c'est-à-dire en obtenant par de faibles variations de température deux réactions successives et opposées, on a pu reproduire, en partant de l'état fondu, de l'orthose, de l'albite, du quartz, de la tridymite, de la leucite, au moyen des tungstates et vanadates alcalins.

III. *Par volatilisation.* — *a*) Par volatilisation proprement dite, en faisant parfois agir un gaz inerte (azote,...) pour faciliter le transport des molécules, on a pu obtenir la cristallisation de certains minéraux (*blende*, soufre, arsenic, cinabre, calomel, réalgar, acide arsénieux).

b) Mais, en outre, certaines *réactions chimiques* ont dû accompagner fréquemment la volatilisation. Ainsi on peut obtenir de l'*oligiste* cristallisé en faisant réagir la vapeur d'eau sur le chlorure de fer gazeux (Gay-Lussac) ; pour faire cristalliser la *cassitérite* et le *rutile*, on peut mettre en présence de la vapeur d'eau avec un chlorure ou un fluorure d'étain ou de titane (Daubrée) ; pour obtenir des *sulfures* cristallisés, on peut faire agir l'hydrogène sulfuré sur un chlorure porté au rouge (Durocher) : ce dernier procédé n'a pas dû être réalisé dans les phénomènes naturels.

On peut également, par un gaz ou une vapeur jouant le rôle de minéralisateurs sur un corps solide, reproduire l'*argyrose* (vapeur de soufre sur l'argent métallique), *l'argent natif* (hydrogène sur sulfure d'argent), le *zircon* (au moyen du fluorure de silicium), *les carbonates métalliques* (grâce à l'action de CO^2).

IV. *En dissolution.* — Dans cette catégorie se placent les phénomènes synthétiques les plus importants. On peut agir :

soit à la pression ordinaire : par évaporation (dépôt et accroissement de cristaux de *gypse*, *chlorure de sodium*, *chlorure de potassium*).

soit avec des solutions sursaturées : par agitation de la solution, par introduction d'un corps étranger ou d'un cristal déjà formé dans la solution. Ces actions ont dû se produire dans la cristallisation du *quartz* qui accompagne les minerais filoniens ; en effet, dans beaucoup de filons, on n'observe pas le concrétionnement successif de ce minéral ;

soit par variations de température modifiant la solubilité : (*Chlorure d'argent* de Sainte-Claire Deville ; *Phosphates de Debray*).

soit avec intervention d'une réaction chimique :

On obtient de la *calcite* et de *l'aragonite* en partant de l'eau et du bicarbonate de chaux ;

soit par endosmose, dialyse. De la *barytine*, de la *fluorine*, de *l'anglésite*, de la *cérusite*... cristallisent sous ces conditions dans des interstices ;

soit par de faibles courants électriques ;

soit par de l'eau pure ou faiblement chargée de carbonates alcalins sous haute pression :

C'est la méthode employée par Sénarmont, Daubrée et Friedel et grâce à laquelle ils ont obtenu le *quartz*, le *feldspath orthose*, les *carbonates* et les *sulfures*, la *fluorine*, la *tridymite*.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Parmi les minéraux filoniens, il est quelques familles naturelles, formées d'éléments presque toujours associés, pour lesquels il est intéressant de constater que le même procédé de synthèse réussit. Ainsi, *dans les filons d'étain*, la cassitérite, le quartz, l'apatite, la topaze, l'émeraude, le mispickel, le wolfram, la bismuthine, les minéraux de l'urane, parfois la tourmaline ; dans les *filons de plomb*, la galène, la blende, la pyrite de fer, le quartz, la barytine, la calcite. Dans le premier cas, on est conduit à admettre l'intervention des minéralisateurs chlorurés ou fluorés sur des dissolutions soumises à de hautes pressions ; dans le second cas, où les sulfures dominent, l'intervention des carbonates ou sulfures alcalins suffit pour réaliser la synthèse. Dans les deux cas, il s'agit des gaz dégagés par les fumerolles que les eaux superficielles ont recueillis pour permettre la cristallisation.

En général, l'ensemble des phénomènes de synthèse montre que les phénomènes naturels qui ont agi dans la formation de la plupart des minéraux sont : les *fumerolles* et les *réactions aqueuses*. Rarement les minéraux ont dû se former par volatilisation et à l'état solide.

Nous pourrons grouper les gisements géologiques en deux groupes, d'après le mode de synthèse des minéraux qui les constituent.

1° Ceux qui résultent de synthèses à l'état fondu (*actions ignées*) ;

2° Ceux qui résultent de synthèses en dissolution avec réactions chimiques (*actions aqueuses*).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE III

LES DIFFÉRENTS TYPES DE GISEMENTS

1. Gîtes d'inclusions. — Ce sont les gîtes où un minéral utilisable se présente dans une roche ignée au *même titre que les autres éléments constituants*; ainsi la pyrite, la magnétite se rencontrent fréquemment dans les roches ignées, en tant qu'éléments constituants de ces roches. La formation de ces gîtes résulte donc des phénomènes qui ont présidé à la formation de la roche elle-même, c'est-à-dire d'une action ignée se produisant en profondeur.

Ces gisements ne constituent pas des gîtes de concentration anormale. Toutefois, exceptionnellement, il a pu se produire, en certains points de la roche ignée, de petites concentrations de la substance utile, comparables aux rassemblements de feldspath qui, au sein des granulites, ont donné naissance à des pegmatites. Par suite, les inclusions sont, dans la plupart des cas, une forme de gisement *rarement utilisable*, plus théorique que pratique. Pour qu'elles soient exploitables, il faut que le minéral inclus ait une très grande valeur comme le diamant, ou bien que des phénomènes d'altération de la roche encaissante et de préparation mécanique aient permis le rassemblement des inclusions. Au point de vue théorique, les gîtes d'inclusions ont un intérêt considérable, puisqu'ils nous montrent le *point de départ de toutes les concentrations ultérieures* et la forme originelle de tous les autres types de gisements.

Les gisements d'inclusions se trouvent :

a) *Dans les roches basiques* ; ils y sont très fréquents, ces roches pouvant être considérées comme une sorte de fonds de creuset ;

b) *Dans des roches acides* ; ils y sont plus rares, les magmas acides légers, abondamment pourvus d'éléments volatils, ayant très souvent donné lieu à des départs de minéraux et, par suite, ayant produit moins d'inclusions et de ségrégations.

A) Roches basiques. — De nombreuses analyses, faites autrefois pour étayer la théorie de la sécrétion latérale, ont montré que les éléments ferro-magnésiens de beaucoup de roches (*micas, amphiboles, pyroxènes*) contiennent des traces de métaux : *Chrome, Nickel, Cuivre,* Cobalt, Bis-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

muth)... Ces traces sont d'ailleurs faibles ; les résultats ne sont pas constants, ils sont parfois douteux. La moyenne des roches contient ainsi :

Chrome, 0,01 % ;

Nickel, 0,005 % ;

En outre, dans les roches basiques, on a parfois, en même temps :

Cuivre (à l'état de Chalcopyrite), 0,005 %.

Ces quantités, quoique faibles, peuvent donner des concentrations importantes de minerais par suite de remaniements ultérieurs.

Magnétite. — La magnétite existe fréquemment en inclusions dans les roches basiques et souvent en quantités assez importantes. Les métallurgies primitives ont utilisé ces inclusions de magnétite, concentrées, après une altération et une première préparation mécanique naturelle, dans les sables des plages (par exemple de la région de Trébizonde). De tels sables à magnétite ont été naguère exploités sur les côtes du Japon, où ils fournissaient un bon minerai absolument pur et sans phosphore. Récemment on a eu l'idée d'utiliser les sables à magnétite de l'Inde et de la Côte de Guinée.

Fer natif. — On connaît des inclusions de fer natif dans des enclaves de dolérites au milieu de basaltes (Ovifak). Il forme parfois des amas volumineux qu'on a confondus avec des météorites (Fer natif de Cânon Diabolo, Fer nickélifère d'Awarua en Nouvelle-Zélande).

Nickel et Cobalt. — Un exemple très typique d'inclusions 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, un véritable gîte d'inclusions. Ces péridotites (péridot + enstatite ou bronzite) renferment, d'une façon constante, du nickel et du cobalt (1 kilogramme à la tonne), avec des grains de fer chromé (1 à 2 kilogrammes à la tonne). Le minerai exploitable (garniérite, hydrosilicate de nickel) provient de l'altération des péridotites, qui a éliminé en partie la magnésie, et du remplissage des fissures de ces roches par une sorte d'argile onctueuse, verdâtre ou brunâtre, encore fortement magnésienne, où s'est opérée la concentration de l'hydro-silicate de nickel. Il y a là comme une sorte de sécrétion latérale.

Platine. — Les gisements de platine comptent au nombre des plus importants gisements d'inclusions utilisés. On exploita d'abord dans l'Oural des sables platinifères (Région de Nijni Taguisk) ; puis on eut l'idée de rechercher la roche mère de ces sables. On trouva le métal en grains très disséminés et en quantité très faible dans des massifs de *dunites* (péridotites) ; sous cette forme, le platine n'est en général pas exploitable.

Les sables platinifères de l'Oural ont beaucoup diminué et, pendant la guerre, on rechercha le platine en Espagne dans des dunites semblables à celles de l'Oural : l'analyse spectrale a permis d'y trouver des inclusions platinifères et même d'y découvrir des points exploitables (Sierra Névada). Actuellement, ces gisements espagnols sont délaissés.

Enfin, il y a quelques années, on trouva en Afrique australe des dunites et péridotites contenant des inclusions de platine et pouvant donner lieu à des exploitations (teneurs atteignant 3 ou 4 grammes à la tonne).

Cuivre. — Outre les traces de chalcopyrite révélées par l'analyse dans presque toutes les roches basiques, on peut également observer de la chal-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

copyrite en inclusions, comme on trouve de la pyrite et de la pyrrhotine, au milieu de *gabbros* (norites), de *diabases*, de *mélaphyres*. Ces inclusions cuprifères sont fort peu importantes, mais elles donnent lieu parfois à des concentrations de cuivre natif dans les amygdales des mélaphyres : le cuivre est alors accompagné de calcite et de zéolithes, montrant le rôle des altérations postérieures dans la concentration du métal (Lac Supérieur). On a exploité des inclusions cuprifères, par exemple en Bulgarie près de Bourgas.

Diamant. — Enfin les gisements diamantifères du Cap dans des cheminées de *péridotites*, constituent un cas tout à fait typique d'inclusions dans des roches basiques (1 gramme de diamant par 5 mètres cubes de roches), Les péridotites altérées ont d'abord été exploitées en surface, où le diamant était naturellement isolé au milieu des produits de désagrégation de la roche mère. Depuis longtemps, on exploite la roche fraîche en profondeur et on retire le diamant par un traitement approprié.

B) Roches acides. — Les gîtes d'inclusions y sont rares.

Etain. — L'étain est toujours directement associé à des granites, surtout à des granites à mica blanc, très acides, avec indice de deux temps de consolidation (*granulites*) ; dans ces roches, la cassitérite se présente avec toutes les formes de passage entre les inclusions et la concentration en bordure de la roche. La teneur en étain peut atteindre 0,5 % dans toute la masse.

Stelzner a reconnu, dans les feldspaths (orthose et oligoclase) des gneiss de Freiberg, la présence de petites inclusions stannifères (0,03 à 0,08 %).

L'étain est rarement exploité sous cette forme d'inclusions ; mais la cassitérite a pu se concentrer dans des réseaux de *veines quartzeuses* au milieu de la granulite. Dans l'impossibilité d'exploiter les veines elles-mêmes, on exploite alors tout le massif. (La granulite qui sépare les veines quartzeuses contient encore un peu de cassitérite.)

Parfois, le long des filons de quartz stannifères, où se produisent toujours des circulations d'eau, la roche a été altérée : il s'est produit des kaolins renfermant de la cassitérite exploitable dans ces conditions.

Cuivre. — On rencontre des *granites cuprifères* tout à fait analogues aux granites stannifères, renfermant des cristaux de chalcopyrite.

Or. — L'or se présente en inclusions dans des *granites*, dans les mêmes conditions que l'étain ; il peut y être d'ailleurs associé à l'étain ou aux minéraux du même groupe. On le rencontre aussi dans des *aplites*, des *trachytes*. Dans certains *gneiss* l'introduction de l'or paraît être liée au métamorphisme régional de profondeur : cet or ne devient exploitable qu'à la suite d'une altération chimique et d'une préparation mécanique naturelle qui l'a concentré en certains points.

Oligiste. — L'oligiste est un élément habituel de la cristallisation de bien des roches acides.

2. Gîtes de ségrégation. — La *ségrégation* ou *sécrétion magmatique* est une opération de liquation ou de différenciation qui, dans un bain igné homogène, cristallisé en vase clos, a eu pour effet d'amener certains éléments, utiles ou non, à se concentrer sur un point. C'est une opération purement ignée, analogue à celles qui se passent dans notre métallurgie ordinaire, où, dans un bain fondu, on constate une certaine tendance à la

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

séparation d'éléments qui n'ont pas le même degré de fusibilité. L'opération a pu être considérée comme s'effectuant sans aucune action de principes volatils ; toutefois on admet généralement aujourd'hui qu'il a pu intervenir une certaine action restreinte d'éléments volatils (vapeur d'eau et même minéralisateurs comme le chlore, le soufre, etc.).

Les gîtes de ségrégation se présentent pratiquement sous la forme de noyaux, boules ou amas restreints, englobés dans une roche ignée qui les entoure de toutes parts. La plupart des ségrégations accusent une oxydation incomplète et renferment, ou des métaux natifs, ou des oxydes salins.

L'origine première des concentrations métallifères rassemblées par ségrégation tient d'abord à la composition initiale du bain de fusion, ensuite au mode de cristallisation et à de très légères variations dans la composition chimique qui ont entraîné, par contre-coup, la concentration d'un métal ou d'un autre. De même, dans la métallurgie, les concentrations particulières d'éléments varient avec la manière dont se fait le refroidissement des bains de fusion.

Il existe des ségrégations de magmas basiques et, beaucoup plus rarement, de magmas acides.

A) Différenciation d'un magma basique. — Dans un magma basique complexe, contenant des minéraux distribués d'une façon homogène, certains *éléments chimiques* tendent à se grouper progressivement d'un côté, certains d'un autre, si bien que le massif qui en résulte présente souvent une composition différente du centre vers la périphérie. Si on considère le cas où des silicates basiques ont commencé par être dissous dans des silicates alcalins, on constate qu'il y a tendance à la séparation de deux roches qui aboutissent : d'une part à des péridots (silicates magnésiens) ; d'autre part à des plagioclases : anorthose ou labrador (silicates alumino-calciques), c'est-à-dire d'une part à des roches comme les péridotites, d'autre part à des anorthosites et à des labradorites. En pratique, il subsiste encore, à côté du péridot, des plagioclases, donnant alors des gabbros à olivine, et, à côté du labrador, des pyroxènes rhombiques déterminant la formation de gabbros à diallage ou à enstatite. Il y a, entre les deux séries de roches, toutes les transitions possibles.

Avec l'excès d'olivine, c'est-à-dire avec la magnésie, partent le chrome, le platine, le nickel et le cobalt. Avec les plagioclases et le gabbro à enstatite se rassemble le titane. Quant au fer, il va, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre.

Nous distinguerons donc deux types de ségrégations basiques :

1° Les ségrégations du groupe du chrome ;

2° Les ségrégations du groupe du titane.

Fer chromé (*Chromite*). — Les ségrégations de fer chromé sont dans des péridotites plus ou moins serpentisées passant parfois à des dunites (Nouvelle-Calédonie, Oural, Asie-Mineure). C'est la forme normale sous laquelle on extrait le chrome industriellement. On trouve toutes les grosseurs depuis la taille du poing jusqu'à des masses de 50 ou 60 mètres de diamètre.

Fer titané. — Les minerais de fer titanifères sont parmi les cas les plus typiques de ségrégations basiques. Certaines labradorites peuvent contenir des ilménites à 40 % de TiO^2.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

A Taberg, en Suède, se trouvent des hypérites à olivine, au centre desquelles se sont isolées des péridotites avec de la magnétite titanifère, très riche en vanadium. Les ségrégations, titano-magnétifères sont fréquentes dans toute la péninsule scandinave. Elles offrent parfois des dimensions colossales (Routivara en Laponie suédoise) ; elles sont englobées presque toujours dans des gabbros ou des diorites avec spinelles. Dans l'état actuel de notre métallurgie, elles sont difficilement exploitables comme minerais de fer à cause de la présence du titane.

Cuivre. — On connaît aussi des ségrégations de pyrite cuivreuse, parfois exploitées, au milieu de diabases (Monte-Catini).

B) DIFFÉRENCIATION D'UN MAGNA NEUTRE OU ACIDE. — Les différenciations portent presque toujours sur des magmas basiques qui donnent très peu de matières volatiles et ne se prêtent que difficilement aux départs.

Toutefois il semble que, dans certains cas, il y ait des ségrégation dans des roches neutres ou acides. A Kirunavara (Laponie Suédoise), on rencontre, au milieu d'un porphyre, un amas de magnétite sans titane qui semble dériver du microgranite encaissant. L'association de l'apatite à la magnétite prouve l'intervention de fluorures et de chlorures volatils qui s'est superposée au phénomène de ségrégation ignée proprement dit. Des gisements semblables existent dans l'Oural et dans l'Altaï.

Pour que tous ces gisements de ségrégation, en milieu généralement basique, soient exploitables, il faut qu'ils aient été mis à nu par l'érosion. En effet, les roches basiques, assimilées à des fonds de creusets, sont des roches de profondeur. Par conséquent, ces gisements se trouvent surtout dans des plates-formes très anciennes, profondément érodées, comme la Scandinavie, le Canada, l'Afrique australe et le Brésil.

3. — Gites de départ immédiat ou de ségrégation périphérique. — Le phénomène de ségrégation tel qu'il vient d'être présenté est un peu théorique. En fait, dès qu'il y a intervention de principes volatils, les éléments métalliques tendent à se porter à la périphérie de la roche et à former des amas fréquemment volumineux : le plus souvent au contact de la roche avec des terrains encaissants inertes, comme des schistes. Donc ce qui différencie ces gisements des précédents, c'est le fait que la concentration s'y est produite, non plus dans la roche, mais à son contact, accusant un commencement de départ volatil.

Les ségrégations périphériques peuvent être de deux sortes :

ou des *ségrégations sulfurées*,

ou des *ségrégations chlorurées*.

Ces dernières à la périphérie de massifs acides constituent un type moins net (cassitérite).

Par contre, les *ségrégations sulfurées* sont les plus caractéristiques et deviennent abondantes pour certains métaux. En particulier, elles donnent des gisements utiles de nickel et de cuivre à la périphérie de magmas basiques.

Nickel et cuivre. — Dans des plates-formes anciennes (Norvège, Suède, Canada), on rencontre fréquemment des massifs de roches basiques, du type des gabbros et des norites, à la périphérie desquels se sont formés des

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

amas de cuivre et de nickel, à l'état de pyrrhotines nickélifères et cuprifères, de chalcopyrites, etc., au contact des schistes encaissants. A Sudbury (province d'Ontario, Canada), on a, dans une cuvette de gneiss laurentiens, un massif intrusif de norite avec des ségrégations périphériques de pyrrhotines nickélifères et cuprifères, renfermant 2,5 à 3 % de nickel ou de cuivre.

Ces mêmes ségrégations sulfurées peuvent donner de simples amas pyriteux, rarement exploités dans ces conditions. Ainsi à Gavorrano, en Toscane, des lentilles d'une pyrite très pure, très recherchée pour la fabrication de l'acide sulfurique, se sont formées au contact d'un massif acide granitique avec des schistes permiens très faillés. La pyrite semble bien être en rapport avec le granite qu'elle flanque sur les deux côtés du massif ; elle est admirablement cristallisée en très gros cubes qui atteignent jusqu'à 5 centimètres de côté.

4. Gîtes de contact du type Banat. — Ces gisements, comme les gîtes de ségrégation périphérique, se trouvent au contact de la roche ignée et des terrains encaissants ; mais ce qui les différencie des gîtes de ségrégation périphérique, c'est que, dans ceux-ci, le minerai reste encore en union avec la roche mère et que, dans ceux-là, le minerai est complètement sorti de cette roche. Le départ y paraît donc plus complet, plus accentué ; l'intervention des phénomènes de pneumatolyse plus prononcée. Ces gîtes de contact semblent former une catégorie intermédiaire entre les gîtes de ségrégation et les gîtes de départ filonien.

En outre, tandis que, dans le cas des gîtes de ségrégation périphérique, les terrains encaissants sont des terrains schisteux inertes, dans le cas des gîtes de contact, les terrains encaissants sont des calcaires, terrains essentiellement actifs, qui se prêtent à la formation par métamorphisme d'une gangue silicatée, enveloppant les minerais.

Les gîtes les plus typiques sont ceux du *Banat* (Yougoslavie). Ils se sont produits au contact des syénites (banatites) avec des calcaires liasiques. Ils offrent une minéralisation complexe de magnétite et de sulfures divers (pyrite, chalcopyrite, galène, blende) ; l'association de la magnétite et de la chalcopyrite est tout à fait caractéristique de ce type de gisements. La gangue silicatée, qui accompagne et enveloppe les minerais, est constituée par des grenats, des amphiboles, des pyroxènes, des spinelles, épidote, etc. Ces silicates calcareux se sont développés aux dépens du calcaire et aussi grâce aux apports pneumatolytiques de fer et de silice ; il n'y a pas eu simplement cristallisation du fer, contenu dans les calcaires, tout à fait insuffisant pour permettre la formation de grenats ferrifères. Le rôle des fumerolles dans ce cas commence à devenir très important et il faut admettre l'arrivée de vapeurs métallisantes, le long de certaines fractures. Le calcaire, au voisinage du gisement, a subi des transformations métamorphiques qui lui ont donné un aspect marmoréen.

De semblables gisements de contact se retrouvent dans le Piémont (Traverselle), dans l'Ouest des Etats-Unis (Arizona), dans le Nord du Mexique (Sonora), etc.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

5. Gîtes d'imprégnations diffuses. — *Formation des gisements.* — On passe des gisements du type Banat aux gîtes d'imprégnations diffuses qui, comme l'indique la figure 9, ne sont plus en relation immédiate avec la roche ignée dont elles procèdent. Le départ des éléments métalliques a été complet : les fumerolles, émises par la roche de profondeur à forme surtout granitique, sont venues se disséminer *dans les schistes encaissants, au voisinage de la roche-mère* et y ont déposé leurs éléments. Il y a là un phénomène très analogue aux venues feldspathisantes qui ont transformé en gneiss les terrains sédimentaires. Les deux phénomènes semblent d'ailleurs contemporains. En même temps que se produisait l'injection feldspathisante, il y a eu départ de *matières sulfurées* dans un état physique qu'il est impossible de préciser, mais qui, grâce à l'action de la vapeur

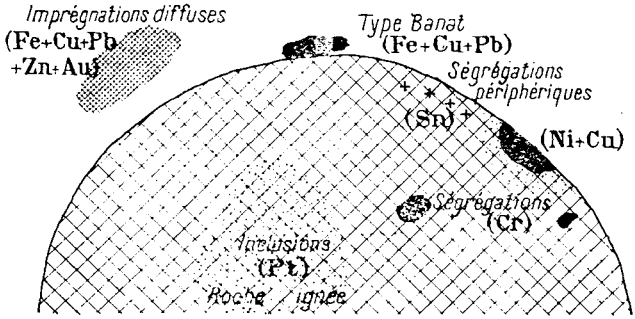


Fig. 9. — Relations des types de gisements étudiés avec la roche ignée.

d'eau sous pression et des carbonates alcalins, devait être intermédiaire entre l'état fondu et l'état liquide et suffisamment fluide pour pénétrer dans de très minces interstices. Ces sulfures (pyrite, chalcopyrite, pyrrhotine, blende, galène) ont cristallisé par masses homogènes à grain fin, ayant rempli d'un coup des systèmes de vides plus ou moins complexes et ne présentant jamais les dispositions zonées et concrétionnées qui caractérisent les dépôts hydrothermaux.

Localisation des gisements. — Les gîtes d'imprégnations diffuses sont surtout développés dans les *plates-formes primitives*, à terrains plissés, affectées par le métamorphisme régional de profondeur et où les roches représentées sont le plus souvent des types de profondeur grenus : Scandinavie, Canada, Brésil, Afrique australe, Inde, Sibérie. Ailleurs, dans les chaînes hercyniennes et mêmes tertiaires, les imprégnations pyriteuses jouent un rôle beaucoup moins important ; elles s'y trouvent dans des terrains moins métamorphiques, en rapport avec des roches d'un type moins profond et se rapprochent de l'allure filonienne.

Intérêt industriel des gisements. — Ces gisements d'imprégnations diffuses, quand ils sont très développés, jouent un rôle industriel important : ils constituent alors de *grands amas exploitables de sulfures métalliques.* Ils affectent aussi l'allure de veines qu'on a parfois confondues avec des filons : cette confusion expose à de graves déboires industriels, ces veines étant toujours très localisées.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les imprégnations diffuses sont également intéressantes par la *présence de l'or* qui s'y développe parfois en association avec la pyrite, surtout quand celle-ci devient arsenicale. Ces gisements aurifères existent dans les boucliers anciens, très érodés, dont il vient d'être question ; ils ont la forme de veines pyriteuses sans continuité, très disséminées au milieu des terrains métamorphiques de ces régions, plus ou moins chargées de quartz et d'or ; la pyrite tend à se transformer dans la zone superficielle en sulfate soluble, laissant l'or à l'état natif dans la roche.

Le ruissellement et les eaux courantes qui exercent leur action sur ces gisements ont très souvent charrié des paillettes d'or dans les alluvions et déterminé la formation de *placers* (Canada, Sibérie, Brésil, Afrique australe, Madagascar). Dans ces pays, les indigènes ont pris l'habitude de chercher de l'or dans les alluvions ; puis les Européens, à leur arrivée, ont essayé d'exploiter à leur tour les alluvions aurifères avec des moyens perfectionnés ; ils ont rencontré bien des déboires, les gisements étant déjà épuisés, la main-d'œuvre très peu diligente. Quant aux veines aurifères elles-mêmes, ou elles sont très rares, ou elles ne permettent pas de couvrir les frais d'exploitation. De cette facilité d'épuisement des alluvions aurifères provenant des imprégnations diffuses, il résulte que ces exploitations aurifères sont temporaires et ont tendance à se déplacer rapidement, dans le même sens que les courants de colonisation et de mise en valeur du pays. En Sibérie, par exemple, elles se sont déplacées de l'Ouest vers l'Est, de l'Obi vers l'Iénisséi, la Léna et enfin l'Amour.

Principaux types de gisements d'imprégnations diffuses. — Les gisements d'imprégnations diffuses sont très polymorphes. On peut les ramener à quatre types, qu'il est bon de connaître :

1° *Les zones de pyritisation diffuse*, zones plus ou moins lenticulaires, dans lesquelles la pyritisation est éparpillée dans tous les joints des schistes. L'allure souvent stratiforme des imprégnations (par exemple à Ammeberg, Suède, dans des gneiss) soulève l'hypothèse sédimentaire ; mais la compacité de la roche imprégnée ne peut pas s'accorder avec une mise en place des sulfures antérieure aux phénomènes de plissements qui n'auraient pas manqué de développer des discontinuités dans les zones métalliques. A cette catégorie appartiennent les imprégnations de pyrite aurifère des plates-formes primitives.

2° Les *fahlbandes* (Fahl, accident heureux) sont des zones de broyage, de dislocation mécanique profonde, un peu comparables aux mylonites, injectées de traînées pyriteuses. Elles peuvent être interstratifiées ou traverser obliquement les terrains rencontrés : schistes, gabbros, amphibolites, etc. Il en est résulté des zones pyritisées, comme par exemple « la zone rouge » du Gard qui correspond à un phénomène de charriage et dans laquelle on a exploité de la pyrite, de la galène et de la calamine. Le type de fahlbandes est surtout caractéristique des régions du Nord (Norvège). Rarement assez riches pour mériter une exploitation particulière, les fahlbandes ont parfois donné lieu à des enrichissements dans les fractures qui les traversent : ainsi, à Kongsberg, la pyrite et les hydrocarbures des fahlbandes ont déterminé la précipitation de sulfure d'argent et d'argent natif dans des craquelures perpendiculaires aux fahlbandes et seulement dans la traversée de celles-ci.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

3° Les *lentilles allongées interstratifiées*, sortes de filons-couches.

4° Les *amas pyriteux* de dimensions considérables, qui se sont formés dans les bâillements des schistes et sont souvent allongés et disposés en chapelets.

Le gisement type de Rio Tinto (Espagne) nous montre un amas de 1.500 mètres de long sur 200 à 300 mètres de large. Il est en relation avec des microgranites. La pyrite a le même grain, très fin, dans toute son étendue : ce fait exclut l'idée d'un remplissage filonien et corespond à un phénomène de prise en masse, très tranquille. Les différents amas ont des formes complexes et se moulent sur les terrains encaissants.

Pratiquement, les amas pyriteux sont des noyaux sans racine profonde, rigoureusement limités, que la surface topographique due à l'érosion a pu couper au hasard (fig. 10). Tantôt ces lentilles peuvent se renfler en profondeur ; tantôt elles s'amoindrissent et il n'est pas possible de prévoir, d'après les affleurements superficiels, ce qu'elles deviennent plus bas ; dans l'exploitation, il faut se confier à la chance. A Sain-Bel (Rhône), la lentille Saint-Gobain, qui se termine vers la surface du sol par plusieurs pointes, se renfle en profondeur et a été l'objet d'une exploitation fructueuse.

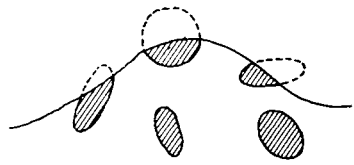


Fig. 10.

Le cuivre, le nickel ou l'or existent souvent dans ces amas pyriteux qui peuvent recevoir de ce fait une double utilisation.

Aux gisements d'imprégnations diffuses, on peut rattacher probablement le gisement du Witwatersrand (Transvaal), où la pyrite aurifère se trouve disséminée dans les interstices du ciment d'un poudingue.

Variations de la teneur en cuivre. — Dans toutes ces masses de pyrite cuivreuse, les variations de la teneur en cuivre sont extrêmement faibles et n'obéissent pas, semble-t-il, à une loi. On avait cru remarquer une diminution de cette teneur en profondeur et une concentration du cuivre dans les parties latérales. Cette diminution de la teneur, à mesure qu'on s'enfonce et qu'une exploitation se prolonge, peut être un phénomène factice : plus une exploitation devient prospère, plus ses prix de revient diminuent et peuvent permettre l'utilisation des minerais pauvres, auparavant rejetés dans le stérile. Mais, avec cette restriction, il arrive que la teneur en cuivre diminue en s'approfondissant du fait des altérations secondaires. Au voisinage de la surface, l'oxydation de la pyrite a donné un chapeau de fer (limonite), appauvri en cuivre, les sels de cuivre très solubles ayant été entraînés vers la profondeur. Au-dessous de ce chapeau, vient la zone de cémentation qui présente un enrichissement marqué en cuivre, les sels de cuivre solubles des zones superficielles étant venus s'y accumuler (5 à 10 % de cuivre). Plus bas encore, les altérations cessent, au voisinage du niveau hydrostatique, et la teneur redevient normale (1 à 3 %).

6. Gîtes filoniens hydrothermaux. — Ils ont été longtemps considérés comme les seuls gîtes métallifères, parce qu'ils sont presque les seuls

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

représentés dans les pays où ont été faites les premières études (Allemagne, France, Angleterre). Depuis que les recherches se sont étendues à d'autres régions, d'autres types de gisements ont été découverts (Scandinavie, Amérique du Nord). Les filons n'en restent pas moins la forme de gisements qui nous intéresse le plus, parce qu'elle se rencontre de préférence à toute autre dans l'Europe Centrale, en France, en Espagne, dans l'Afrique du Nord.

Les gîtes hydrothermaux sont essentiellement constitués par le remplissage minéral d'une *fracture* ou d'un *vide quelconque* de l'écorce terrestre. Ce remplissage s'est effectué par l'arrivée *d'eaux chaudes tenant des fumerolles en dissolution.*

L'étude de ces gisements comprendra l'étude successive de deux catégories de phénomènes bien distincts :

A. Origine du vide rempli.

B. Mode de remplissage de ce vide.

A. Etude du vide incrusté. — L'idée commune qu'on se fait d'un filon est celle d'un grand mur vertical, d'un grand dyke nettement séparé des terrains stériles ou épontes. C'est une idée un peu trop schématique. La fracture incrustée n'est pas forcément verticale et le filon n'est pas toujours rigoureusement délimité.

Le vide incrusté peut être d'origine quelconque. Le plus généralement, c'est une fracture tectonique. Mais il peut s'agir aussi de fissures de retrait dans des roches volcaniques, d'un simple décollement entre deux bancs stratifiés donnant naissance, soit à un filon-couche, soit à un gisement en selle. On peut avoir encore des vides complexes en terrains calcaires réalisés grâce aux diaclases de la roche. Enfin les contacts hétérogènes entre couches de perméabilité différente peuvent être métallisés et donner des filons-couches.

1) *Fractures tectoniques. Rôle.* — Les fractures tectoniques, les *failles*, ont joué un grand rôle dans les formations métallifères ; elles sont en effet en relation possible avec la zone interne et par là peuvent offrir un passage facile aux matériaux d'origine profonde. De plus, mettant en contact des terrains de nature différente, elles sont un chemin naturel pour les circulations d'eau.

Beaucoup de ces fractures tectoniques se sont *réouvertes à différentes reprises* et se sont prêtées à *plusieurs remplissages* successifs, d'âges très divers. Un certain nombre de sources thermales actuelles jaillissent par des fractures réouvertes qui ont été souvent remplies dès l'époque permienne.

Localisation. — En général, les grandes fractures métallifères sont *localisées à la périphérie des zones de plissements*, en relation avec les grands mouvements verticaux connexes de ces plissements, plutôt que dans les parties centrales comprimées de ces zones plissées.

Dans le sens vertical, les filons arrivent toujours à s'appauvrir et à disparaître en profondeur. Ce n'est pas un simple accident ; mais, à la condition de s'enfoncer assez, on doit considérer la zone qui a donné naissance à des fractures comme limitée. Dans toute région de plissements, on peut distinguer plusieurs zones dans le sens vertical :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

a) La zone superficielle qu'on observe dans les hautes montagnes est une zone de charriages, de cassures horizontales qui ne facilitent pas la formation des filons ; les terrains y sont meubles, fragiles et sujets à s'émietter plutôt qu'à se fracturer. Aussi la haute montagne est-elle peu minéralisée.

b) La zone de demi-profondeur, en rapport avec des roches microgrenues, est, par excellence, la zone filonienne.

c) La zone profonde, en rapport avec des roches de profondeur (grenues), est la zone des ségrégations et imprégnations diffuses. Elle comprend très rarement des filons (tellurures d'or de l'Ontario directement issus de porphyres).

Suivant que c'est l'une ou l'autre zone qui affleure, du fait des actions érosives, on trouvera ou on ne trouvera pas le type filonien représenté.

En France, les plissements alpins ont donné peu de filons dans la zone des hautes montagnes qu'ils ont édifiées ; mais ils en ont donné beaucoup par contre-coup dans les montagnes plus anciennes (Massif Central). Les zones de plissements hercyniens sont, en outre, riches en métallisations filoniennes datant de l'époque primaire.

Dans les autres régions hercyniennes, les filons sont également très nets et très abondants ; mais ces régions ont pu être plus ou moins érodées et leur surface est plus ou moins voisine de la zone profonde, non filonienne. Par exemple, dans la Meseta espagnole, on trouve de très beaux filons de plomb qui s'arrêtent tous à la même profondeur, sans doute là où doivent cesser les fractures filoniennes. Il semble donc que ces filons soient abordés à la surface, très près de leur terme extrême.

Dimensions. — Les fractures filoniennes peuvent présenter des dimensions très variables, qui sont parfois considérables. En *longueur*, elles atteignent quelquefois une centaine de kilomètres. Le « Mother Lode » de Californie est un des filons les plus connus (112 kilomètres). Dans le Massif Central français (région de Montluçon, Aubusson, Evaux), un grand dyke quartzeux, formant saillie dans la topographie et d'où partent des veines latérales aurifères (exploitées au Châtelet, Creuse), a des dimensions presque comparables (100 kilomètres). Ces grands filons ne sont pas métallisés sur toute leur longueur. Dans l'immense majorité des exploitations minières, un filon de 1 kilomètre de long est déjà un beau filon ; bien souvent, il n'a pas même cette longueur (500 à 600 mètres).

En *largeur*, la fracture filonienne peut être très mince. A Kongsberg (Norvège), elle a parfois l'épaisseur d'une feuille de papier. Exceptionnellement, elle atteint des largeurs de 50, 80, 100 mètres (Mother Lode, Comstock) : dans ce cas, il s'agit de filons bréchiformes, remplis partiellement par des roches éboulées ou de filons composés de veinules disséminées. Pratiquement les beaux filons ont 3 à 4 mètres de largeur, ou même plus souvent 0 m. 80 à 1 mètre. Sur cette largeur, l'*épaisseur réduite* qui correspond à la métallisation occupe souvent à peine quelques centimètres.

Forme. — La fracture filonienne peut être unique ; c'est dans ce cas que les filons atteignent la plus grande valeur. Cette fracture type peut être *verticale* ou *inclinée*. Elle peut être *plane*, ou *sinueuse*, ou présenter une courbe, comme le filon du Comstock engendré par le glissement de deux

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

terrains l'un sur l'autre (fig. 11). Elle *se limite en direction*, en se coinçant ou en s'éparpillant en une série de veinules qui elles-mêmes arrivent à se coincer. Elle peut disparaître provisoirement en se heurtant à un certain massif très dur, puis reparaître de l'autre côté du massif ; ainsi à Sarrabus (Sardaigne), le filon disparaît dans la traversée d'un dyke de microgranulite. Elle *se limite également en profondeur* comme nous l'avons déjà dit plus haut, et se termine de la même façon qu'en direction : cette limitation se produit souvent à une profondeur telle qu'elle n'a pas d'importance pratique et qu'il est rare de la mettre en évidence.

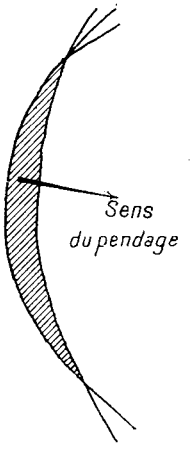


Fig. 11. — Plan schématique du filon du Comstock.

Enfin la fracture se *bifurque* quelquefois, les bifurcations restant séparées (fig. 12) ou se réunissant à nouveau (fig. 13).

Salbandes, Filons composés. — Les terrains encaissants (*épontes*) peuvent être séparés du filon par des *salbandes*, sortes de ciment argileux dû aux actions mécaniques, aux frictions qui se sont produites avant, pendant ou après le remplissage filonien. Ce sont les mêmes actions mécaniques qui ont déterminé la formation de surfaces polies (*miroirs* ou *cuirasses*) sur les éléments d'un premier remplissage.

Dans certains cas, les salbandes n'existent pas et le filon n'est pas



Fig. 12.



Fig. 13.

nettement délimité ; il est constitué par un axe métallisé avec des imprégnations métalliques de chaque côté dans les deux épontes (fig. 14).

Au lieu d'incruster une fracture unique, les eaux ont pu pénétrer dans une zone de roche fissurée, crevassée en tous sens, donnant comme un faisceau de filons, comme une sorte d'écheveau de minéralisation extrêmement compliqué, dont chaque petite veine est métallisée (fig. 15). C'est



Fig. 14.

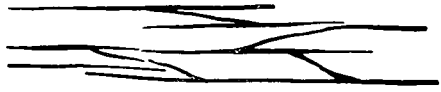


Fig. 15. — Filon composé.

le *filon composé*. Ce fait correspond à une cassure éparpillée en terrains tendres, tels que des schistes.

Généralement le remplissage d'un filon contient, en plus des minerais, des blocs de grosseurs très diverses, empruntés à la roche encaissante (brèches d'éboulis et brèches de friction), cimentés par la minéralisation. Ces blocs ont parfois été réduits à l'état d'argile. Certains auteurs ont attribué inexactement à une éruption boueuse la présence de cette sorte de boue argileuse.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Champs de filons. — En réalité une faille (ou un filon) n'est jamais isolée ; mais on trouve souvent des ensembles de fractures, dont chacune peut être minéralisée. Il en résulte des sytèmes filoniens, comprenant parfois 1.500, 1.800, 2.000 filons et appelés *champs de filons*.

Certains de ces systèmes reproduisent la disposition en faisceaux signalée plus haut, avec éléments parallèles, mais sur une largeur beaucoup plus grande (1 kilomètre par exemple). D'autres systèmes ont pu prendre naissance par des mouvements de torsion mis en évidence par les expériences de Daubrée. Cet auteur a soumis à une légère torsion des glaces rectangulaires, solidement maintenues par une de leurs extrémités ; il a obtenu toute une série de cassures du verre : d'abord un système principal en dents de scie, puis des fractures secondaires partant de chaque dent et sur lesquelles viennent s'appuyer de petites cassures perpendiculaires (fig. 16). C'est par de semblables mouvements de torsion qu'ont pu se former les champs de fractures, assez analogues, de Freiberg et de Vialas.

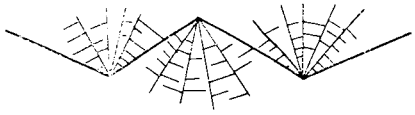


Fig. 16. — Expérience de Daubrée.

Dans d'autres cas, les champs de fractures constituent une sorte de quadrillage qui ne révèle pas de torsion (fig. 17).

Enfin il y a des systèmes en toile d'araignée, avec convergence des failles principales vers un point central (fig. 18). Ces systèmes offrent des analogies avec les cassures obtenues dans une vitre par un choc en un point central (Exemple : Champ de fractures d'Annaberg).

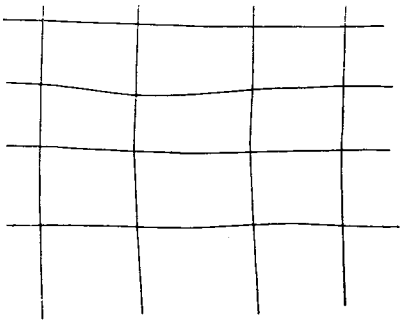


Fig. 17.

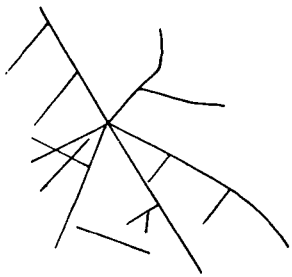


Fig. 18.

Influence mécanique du terrain encaissant. — Les cassures tectoniques sont influencées par la nature des terrains encaissants. Dans une roche trop dure, la cassure s'arrête, se coince ; dans une roche tendre, comme des schistes, elle a tendance à s'éparpiller en une série de petites cassures secondaires. Les roches de dureté moyenne offrent les meilleures conditions pour l'ouverture et la conservation d'une fracture nette ; c'est ce que montre schématiquement la fig. 19.

La dureté moyenne s'entend par comparaison avec les terrains voi-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

sins ; cette relativité explique que, suivant les régions, les mineurs considèrent le granite comme une roche encaissante, tantôt favorable, tantôt défavorable aux filons.

Si, d'ailleurs, comme cela se présente habituellement, la fracture est

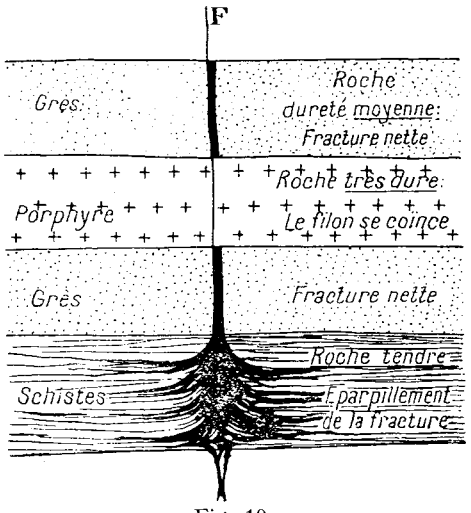


Fig. 19.

oblique par rapport à la direction des couches, au lieu d'être perpendiculaire, elle tendra à s'éparpiller dans les schistes en veinules *parallèles à la*

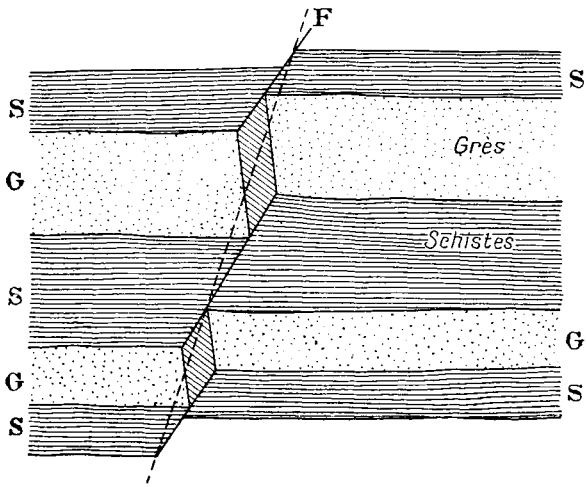


Fig. 20.

stratification. Au contraire dans les roches dures ou de dureté moyenne, elle tendra à s'ouvrir perpendiculairement à la stratification. Il en résulte qu'un filon recoupant obliquement des alternances de grès et de schistes

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

dessinera, en passant des grès aux schistes, une série de gradins (fig. 20) et il y aura formation de poches dans les grès là où l'inclinaison est la plus voisine de la verticale et où le toit ne peut pas glisser sur le mur.

Corrélativement à ce changement d'allure de la fracture dans les différentes strates qu'elle traverse, on observe aussi de grands changements dans la minéralisation du filon. En moyenne, les parties riches du filon sont celles où la fracture est encaissée dans des strates de dureté moyenne et les parties les plus riches, celles où l'inclinaison est la plus voisine de la verticale.

2) *Fissures de retrait.* — Les roches ignées, en se refroidissant, ont pu se contracter et donner lieu à des fissures, dans lesquelles ont cristallisé des fumerolles. Ces fissures ont peu de continuité, se limitent rapidement en tous sens, s'éparpillent dans les massifs ignés (granulite, andésite, rhyolite...), où elles ont tendance à converger en profondeur comme les rayons d'un sphérolite (ainsi, pour certains filons aurifères, dans des trachytes de Transylvanie). On connaît des gisements d'or dans de semblables craquelures sans continuité, en Australie, dans le Colorado. Dans certains cas, ces fissures se prolongent dans les terrains encaissants au voisinage immédiat de la roche éruptive.

3) *Filons-couches.* — Ce sont des filons presque horizontaux, tout au moins interstratifiés, qui peuvent provenir du remplissage d'un vide laissé entre deux bancs stratifiés par un simple phénomène de décollement, notamment dans des masses schisteuses. On les a parfois confondus avec des gîtes sédimentaires ; cependant ils ont une extension beaucoup plus limitée et ont une origine épigénétique.

Ils peuvent résulter aussi de fractures horizontales comme les contacts anormaux dus aux charriages ; mais ces fractures sont souvent obstruées par le tassement des terrains superposés et sont très rarement minéralisées.

Alors que, dans les Alpes, on trouve quelques filons très éparpillés et de petites veines métalliques dispersées, sans grande valeur, alors que, dans le Massif Central, les filons sont plus ou moins verticaux, les filons-couches sont fréquents dans les Pyrénées, souvent au contact de schistes.

4) *Gisements en selle ou poches.* — Les phénomènes de plissements en terrains schisteux ont produit fréquemment des décollements entre des couches de compacité différente, localisés surtout aux charnières anticlinales et moins souvent aux charnières synclinales. Il en est résulté des sortes de poches anticlinales (fig. 21) ou synclinales dans lesquelles ont pu se constituer des lentilles allongées suivant la direction même du pli et dont la coupe transversale montre la forme de selles. On trouve parfois 7, 8, 10 poches superposées sur le même anticlinal. Les poches synclinales sont moins fréquentes et moins importantes. Tels sont les gisements aurifères de Bendigo (Australie) et les gisements argentifères de Broken Hill (Australie). Il y a de grandes analogies avec les

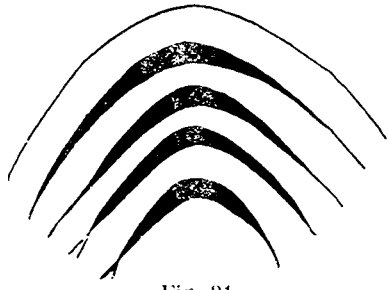


Fig. 21.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

bâillements des schistes qui ont permis la formation d'amas pyriteux ; toutefois les gisements en selles sont plus étendus et s'associent étroitement avec tous les autres types filoniens : on peut donc en déduire leur caractère nettement hydrothermal et filonien.

5) *Chambres, Tuyaux, Grottes en terrains calcaires.* — Le calcaire est une

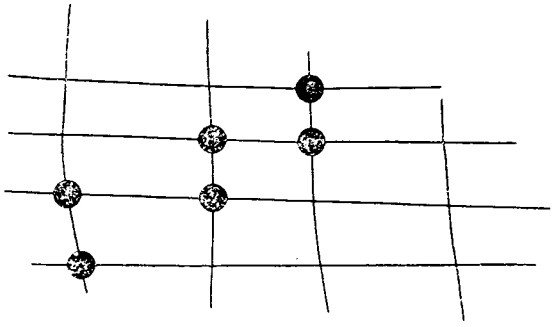


Fig. 22.

roche extrêmement fissurée, dans laquelle les *diaclases* découpent un système parallélipipédique par trois séries de plans : les plans de joints horizontaux et deux séries de plans verticaux perpendiculaires aux premiers et perpendiculaires entre eux. Dans certains cas, ces diaclases forment

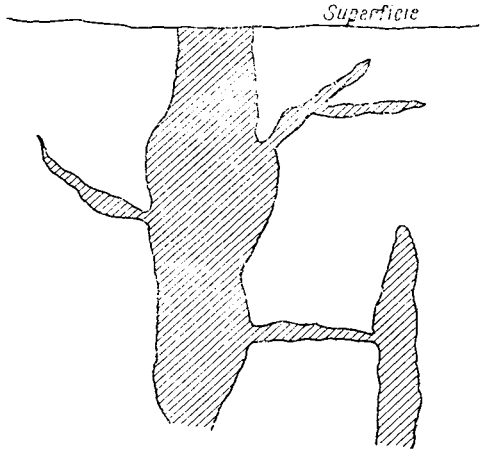


Fig. 23. — Coupe verticale théorique d'un puits minéralisé.

de véritables zones de broyage. De toutes façons, comme nous le préciserons plus tard, la rencontre de terrains calcaires par un système filonien modifie aussi bien l'allure des vides incrustés que leur remplissage.

Les *eaux d'infiltration*, chargées d'acide carbonique circulant dans ces diaclases, ont contribué à les élargir, par des corrosions à la fois mécaniques et chimiques. Leur action a été surtout active aux points de convergence des fissures principales. C'est en ces points qu'elles ont creusé

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

des grottes, des chambres disposées en damiers, quelquefois en marches d'escaliers, et communiquant entre elles par des veines étroites (fig. 22). Dans certains cas, il a dû y avoir aussi action *d'eaux ascendantes*, sous pression, chargées de fumerolles et de CO^2 et capables de dissoudre le calcaire.

Tous les vides ainsi formés : *chambres*, *grottes*, *escaliers*, *tuyaux*, *zones de broyage*, ont pu être métallisés par les eaux ascendantes fumerolliennes (Derbyshire, Colorado, Australie).

Au Mexique (Mapimi), on connaît dans les calcaires des avens métallisés et même des *puits* grandioses, de véritables abîmes (650 mètres de haut, 40 mètres de diamètre) reliés par des galeries obliques et complètement remplis de minerais. L'aspect général est celui de gigantesques troncs d'arbres d'où partent des branches latérales qui divergent, bifurquent et rejoignent des troncs voisins (fig. 23). Dans ces colonnes minéralisées, on rencontre des zones d'enrichissement en poches.

Dans l'Idaho (White Knob), un gisement en terrain calcaire présente un aspect tout à fait semblable.

Ces formes s'apparentent avec les *cheminées d'explosions* verticales et minéralisées des terrains non calcaires. A Cripple Creek (Colorado), une cheminée de 300 mètres de haut et de 4 à 6 mètres de diamètre dans le basalte, est remplie par des brèches basaltiques cimentées par des tellurures d'or et de la calcite.

6) *Rôle des contacts hétérogènes.* — L'existence de contacts hétérogènes

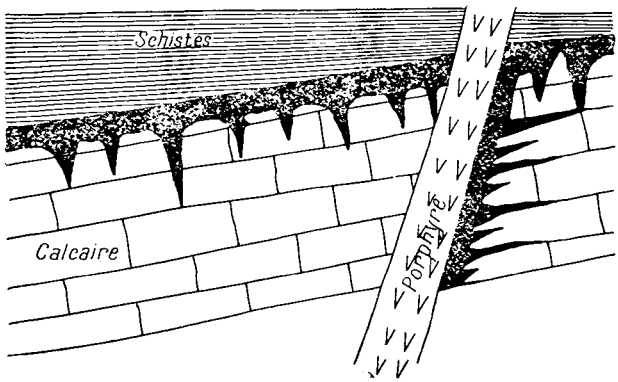


Fig. 24. — Schéma d'un gîte de contact.

entre terrains d'inégale perméabilité (calcaire perméable et schistes imperméables ; calcaire perméable et porphyre, etc.) a très souvent déterminé une localisation des eaux métallisantes, dont sont résultées des sortes de *filons-couches* parfois très étendus, surtout quand ces eaux pouvaient s'accumuler sous pression dans la couche perméable. En même temps, la métallisation s'est répandue au voisinage du contact dans toutes les fissures de la roche perméable (*griffons*).

Ce type a une importance considérable et est très souvent réalisé pour les gisements de zinc. La transformation facile de la blende en calamine

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

dans de semblables calcaires a eu pour effet de donner à de tels gîtes une forme en *amas* très profitable. Ainsi se présentent les gîtes calaminaires de la Sardaigne, de la Vieille Montagne et du Laurion grec (fig. 24). On connaît des gisements de plomb dans des conditions très analogues (Gîtes de Leadville au Colorado : contact de calcaire et de microgranite). A Pierrefitte, dans les Pyrénées, où la venue métallifère s'est disséminée dans des schistes en veinules généralement inutilisables, le gisement principal s'est formé au contact des schistes et de microgranulites, celles-ci ayant arrêté les eaux de circulation.

Un phénomène du même genre s'est produit quand, au milieu d'un ensemble de terrains imperméables aux eaux, celles-ci ont rencontré une strate poreuse et perméable où elles se sont concentrées : elles ont pu imprégner de minerai la strate perméable dans toute son étendue ; il en résulte l'apparence d'une *couche de minerai stratiforme*. Tel est le cas du gîte de mercure d'Almaden (Espagne), où des couches verticales de grès siluriens ont été imprégnées dans tous leurs interstices par de la silice de deuxième formation et par du cinabre.

Beaucoup de conglomérats et de grès plombifères ou cuprifères, pour lesquels on avait admis une origine sédimentaire, sont dans le même cas. Peut-être en est-il de même pour les conglomérats aurifères du Witwatersrand (Transvaal), où l'or à l'état de pyrite aurifère se trouve dans le ciment d'un conglomérat quartzeux. On peut se demander si cette pyrite n'est pas due à une intrusion postérieure dans les interstices du conglomérat primitivement stérile : les vides entre les galets auraient pu jouer le rôle de filon pour la montée des eaux pyriteuses.

7) *Vides creusés par les eaux thermales mêmes. Substitutions.*— Dans bien des cas, les eaux thermales ascendantes, chargées de solutions métallifères, de CO^2, d'acides (H^2S, SO^4 H^2,...) ont été loin de rester inertes et 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 élargi la crevasse suivie préexistante de forme quelconque, l'aurait incrustée et, dans des cas particuliers (milieu calcaire), se serait répandue autour d'elle à la façon d'une tache d'huile, en exerçant une action de substitution moléculaire, laissant toutefois subsister certains noyaux intacts et stériles. Mais on a peine à distinguer de telles réactions originelles des réactions ultérieures dues aux altérations ; car la nature de la roche encaissante a joué un rôle, non seulement au moment du remplissage, mais plus tard encore, au cours des altérations et des remises en mouvement.

B. Etude du remplissage. *Age.* — Le remplissage est-il connexe de la formation du vide ? Cela n'est pas nécessaire, il peut être postérieur. Mais, en général, il n'a pas dû s'écouler un grand laps de temps entre l'ouverture de la fracture et son remplissage ; les fractures ont dû être souvent remplies *presque immédiatement*.

Une preuve nous est fournie par la localisation des sources thermales actuelles : c'est précisément dans les régions disloquées depuis peu qu'elles sont abondantes, là où les fractures encore ouvertes permettent leur circulation. Au contraire, elles sont presque inexistantes dans les régions de formation ancienne, où les fractures se sont refermées depuis longtemps,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

remplies pour la plupart par des concrétions minérales. D'ailleurs, il est peu vraisemblable qu'une fracture puisse rester longtemps ouverte. Il est nécessaire de tenir compte de l'éboulement de blocs provenant de la roche encaissante et formant arc-boutant entre les deux parois du filon ; il faut remarquer, en outre, que les eaux en profondeur exercent une pression qui peut empêcher l'obstruction complète de la fissure par les produits détritiques tombés du haut.

L'étude de l'âge des filons conduit, toutes les fois qu'on peut la préciser, à cette conclusion qu'ils sont pour la plupart assez récents et ne se rencontrent guère que dans les régions qui n'ont pas été trop profondément érodées. Ils sont donc, en Europe Centrale, de deux âges principaux, *hercynien* et *alpestre* et les filons tertiaires sont beaucoup plus nombreux que les filons primaires. Une grande partie des filons des massifs hercyniens sont, d'ailleurs, d'âge tertiaire et doivent leur existence à des dislocations produites sur les régions anciennes par la surrection des chaînes alpines.

Agent du remplissage. — Le remplissage des filons s'est fait par *voie aqueuse*, par circulation d'eaux. Il ne peut s'agir d'un remplissage par voie ignée ; en effet :

1° On ne trouve jamais trace de fusion dans les filons métallifères ;

2° On constate dans la plupart une *allure concrétionnée* et parfois l'existence de géodes centrales, incompatibles avec une action ignée ;

3° Tous les éléments des filons se retrouvent dans les eaux minérales et l'état où ils se rencontrent, très différent de celui où on les voit dans les roches ignées, est au contraire analogue à celui où ils existent dans les dépots sédimentaires, c'est-à-dire formés par les eaux ;

4° Certaines gangues (calcite, barytine, fluorine), accompagnant les minerais, sont susceptibles d'être reproduites par voie aqueuse et non par fusion ;

5° Le quartz filonien et même des minerais renferment des inclusions liquides, formées à basse température ;

6° La forme de certains gisements (gisement de contact hétérogène, remplissage de grottes, pénétration dans des grès...) est incompatible avec l'hypothèse ignée.

Cette circulation des eaux s'est-elle faite par en haut ou par en bas ? Le mode de circulation *per ascensum*, plus généralement admis, paraît démontré par la forme même des gisements et leur continuité jusqu'à des profondeurs de 1.000 et 1.500 mètres ; une fissure remplie par en haut aurait dû rapidement s'obstruer au sommet et rester vide au-dessous. On s'imagine difficilement comment des filons, tels que ceux de Konsberg, minces comme des feuilles de papier et se prolongeant sur 600 mètres de profondeur, auraient pu se remplir autrement que par en bas. De plus, la forme sulfurée des minerais, dans la plupart des filons, implique un milieu réducteur ; les oxydes, rares, n'existent qu'en surface et disparaissent vite en profondeur. Il est certain que, si les minerais avaient été amenés *per descensum*, on trouverait des oxydes beaucoup plus bas. Enfin, et surtout, l'origine des minerais pàrait être liée aux magmas éruptifs profonds.

Toutefois l'action par en haut, *per descensum*, doit être retenue pour les phénomènes de remise en mouvement (boisages métallisés, outils en fer de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

mines anciennes retrouvés incrustés de galène, cinabre, remplissages de grottes, etc.) En outre, l'atération superficielle des roches donne des oxydes de fer et de manganèse qui ont pu pénétrer par en haut dans les fissures. Mais ce procédé nous paraît être resté exceptionnel.

En résumé, nous pouvons admettre deux groupes de phénomènes bien distincts : le premier (*per ascensum*), le plus important, a amené les minerais de la profondeur, grâce à l'action d'eaux dissolvantes et de minéralisateurs (Chlorures, Fluorures, Sulfures, etc.) ; le deuxième (*per descensum*) n'a fait que remanier les venues primitives d'une origine quelconque.

Origine et circulation des eaux filoniennes. — Les eaux qui ont incrusté les filons sont arrivées de la profondeur à l'état de sources *thermales* qui sont le *plus généralement des eaux superficielles* infiltrées et reparaissant au jour après des circuits artésiens plus ou moins compliqués. Toutefois, une petite partie des eaux thermales peut être d'origine profonde et due à la fusion des roches (eaux juvéniles). Toutes ces eaux ont circulé *sous pression* dans les fractures avec une tendance à monter vers la surface. Des exemples actuels nous montrent le phénomène sous une forme restreinte : Geysers du Yellowstone Park, du Mexique, d'Islande, de la Nouvelle-Zélande, sources d'Héliopolis ou d'Hamman Meskoutine, qui déposent surtout du calcaire et de la silice ; mais on peut imaginer des eaux chaudes, moins appauvries, venant de la profondeur et y ayant subi une métallisation au contact de fumerolles ou d'eaux juvéniles très minéralisées.

Origine de la métallisation. — Il y a une *relation très nette entre les minerais et les roches ignées.* Cette relation d'origine apparaît par la seule localisation des champs métallifères dans les zones tectoniques qui portent la trace d'actions ignées (Ouest-américain, Mexique, Bolivie, Chili, Japon, etc.) et par leur absence dans des zones plissées sans manifestations ignées telles que le Jura. Certains minerais (comme la cassitérite) sont presque toujours en contact avec la roche dont ils proviennent. D'autres se sont beaucoup plus éloignés de la roche-mère : c'est le cas du plomb ; toutefois un certain nombre de gisements plombeux se trouvent au contact des microgranites. Dans le détail, nous verrons que chaque métal se rattache, non seulement à une zone ignée quelconque, mais, suivant sa nature propre, à une roche ignée déterminée : l'étain, les métaux du même groupe, à des roches de cristallisation profonde, à structure granitique ; la stibine, le cuivre, le plomb, le zinc, à des roches microgranitiques ; l'argent, le mercure, à des roches microlithiques.

Mais, si les minerais proviennent des roches ignées qui en contiennent toujours des traces, comment en sont-ils partis ? Les métaux seuls n'auraient pas été solubles dans les eaux filoniennes : il a fallu, pour leur donner de la mobilité, l'intervention d'éléments, susceptibles de former avec eux des combinaisons volatiles et solubles, éléments que l'on nomme improprement des *minéralisateurs*. Certains d'ailleurs n'ont joué qu'un rôle de catalyseurs, en favorisant des réactions chimiques sans apparaître dans les produits résultant de ces réactions.

Ces minéralisateurs sont l'eau, le chlore, le fluor, le bore, le phosphore, le soufre, le carbone, dans quelques cas l'arsenic, l'antimoine, etc. Ils

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

ont donné naissance à des *fumerolles*, semblables à celles qui se dégagent des roches volcaniques actuelles, au cours des phénomènes éruptifs ; et, dans ces fumerolles, en voie de refroidissement progressif, les chlorures, les sulfures et les carbures ont joué successivement un rôle très important. Ces vapeurs se sont dissoutes dans les eaux thermales incrustantes qui les ont amenées vers la surface.

Précipitation des métaux. — Comment les métaux en dissolution dans les eaux thermales ont-ils été amenés à se précipiter d'une façon stable dans les fissures filoniennes ? Les causes de précipitation sont assez mal connues, car nous ignorons les circonstances les plus importantes du phénomène : profondeur et éloignement du magma éruptif, température, pression, nature des éléments dissous, etc. Mais on peut en imaginer de nombreuses.

On expliquait autrefois le phénomène uniquement par des *changements dans les conditions de température et de pression* déterminés par la rencontre d'eaux froides, par des modifications dans les dimensions de la fissure ou en rapport avec la surface topographique ; mais on oubliait que les filons, actuellement en surface, avaient pu se former à 2 ou 3 kilomètres de profondeur et plus, où des différences de 10 à 50 mètres ne pourraient avoir aucune importance. Pour amener la précipitation, il a suffi en général *que certains éléments volatils en dissolution disparaissent* ou qu'il y ait *concentration et sursaturation* déterminant une prise en masse. On doit penser aussi à la *réaction chimique d'autres substances* : le cuivre des gisements du Lac Supérieur s'est peut-être précipité en présence de la magnétite contenue dans les métaphyres. La précipitation s'est souvent faite à la rencontre des *filons croiseurs* déjà minéralisés, ou de certaines zones appelées *fahlbandes*, généralement imprégnées de pyrite et quelquefois de matières charbonneuses : ainsi les veines de calcite de Kongsberg sont seulement argentifères à la traversées de fahlbandes pyriteuses. Les matières hydrocarburées semblent avoir joué un rôle important dans la précipitation du cinabre et de l'argent : le cinabre, dans ses remises en mouvement récentes, se précipite volontiers sur les vieux bois de mines.

Enfin des *phénomènes électriques* ont pu intervenir dans la précipitation.

Gangues. — On a l'habitude de distinguer, parmi les minéraux qui entrent dans le remplissage d'un filon, des *minerais* et des *gangues*, ce dernier mot étant réservé aux produits pierreux et réputés stériles qui accompagnent les minerais et qui doivent en être séparés pour obtenir un produit marchand. La distinction est un peu théorique ; car tels minéraux, considérés comme gangues dans un gisement, peuvent être minerais dans un autre (sidérose, diallogite, pyrite, etc.). Toutefois, il y a toujours des substances stériles dans un filon ; ce sont :

1° Le *quartz* (très abondant) ;

2° Des *carbonates* (calcite, dolomie, sidérose, diallogite ; plus rarement, witthérite, strontianite) ;

3° Des *sulfates* (barytine, célestine ; parfois gypse) ;

4° Des *fluorures* (fluorine) ;

5° Des *éléments accessoires*, comme des silicates (grenats, amphiboles, pyroxènes), comme des particules empruntées mécaniquement aux épontes.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Dans la plupart des cas, la gangue semble avoir la même origine que les minerais. Tel doit être en particulier le cas de la silice assimilable à la cassitérite ou au wolfran. Mais, si l'on considère le rôle de l'oxygène dans les filons, on constate que la grande majorité des filons ne contient de minerais oxydés qu'au voisinage de la surface et par suite d'un phénomène d'altération superficielle, alors que les gangues, même en profondeur, sont en général des composés oxygénés. Les éléments de la gangue, carbonates, sulfates, etc. peuvent donc avoir une autre origine que les minerais associés. Il n'est pas impossible, en effet, que les eaux thermales, circulant dans des terrains solubles, comme des calcaires, s'y soient chargées de matières qui ont pu se précipiter dans le filon avec le reste, sans intervention de fumerolles. En outre, toutes les manifestations, et les remises en mouvement d'origine superficielle ont eu pour effet d'augmenter la proportion de ce genre de gangues. Ainsi, la calcite résulte fréquemment d'un apport superficiel, de même que la barytine qui disparaît souvent en profondeur. Nous admettrons donc, pour les gangues, les *deux origines, profonde et superficielle*. Le phénomène d'apport latéral est particulièrement accentué dans les remaniements au voisinage de la surface.

Pour le quartz qui est la gangue la plus répandue, l'origine profonde semble, comme je viens de le dire, de beaucoup la plus fréquente. On connaît l'abondance de la silice dans les magmas, surtout acides, qui aboutissent à des veines quartzeuses par l'intermédiaire de pergmatites. Le silicium viendrait de la profondeur, l'oxygène résulterait de la dissociation de la vapeur d'eau ; très avide d'oxygène, le silicium l'aurait immédiatement fixé comme font certains métaux (étain, manganèse, uranium) qu'on trouve à toute profondeur à l'état d'oxydes.

Pour les métaux eux-mêmes, on peut quelquefois admettre aussi les deux origines, bien que l'origine superficielle soit, dans ce cas, beaucoup moins importante.

Structure des filons. — Nous pouvons distinguer quatre types principaux de structure filonienne.

1° Les *filons rubanés*, dans lesquels on trouve de part et d'autre des épontes un certain nombre de zones minéralisées parallèles, tantôt de minerais, tantôt de gangues, qui se répètent symétriquement sur les deux parois. Ils se sont formés par une série de précipitations effectuées sur une fente progressivement rétrécie, grâce à des modifications successives dans la minéralisation des eaux ou dans les conditions extérieures de la précipitation.

2° Les *filons bréchiformes*, qui contenaient avant leur minéralisation une brèche de fragments empruntés aux parois ou à un remplissage antérieur. Le remplissage forme des bandes concrétionnées autour de chaque fragment de la brèche, de même que le long des parois du filon (Comstock).

3° Les *filons confus*, qui ne présentent plus de zones rubanées et concrétionnées et semblent résulter d'une sorte de prise en masse. Ce sont généralement des filons de quartz englobant des minéraux disséminés sans aucun ordre (filons stannifères).

4° Les *filons composés* (*Stockwerks*) qui sont constitués de veines multiples et prennent l'aspect d'une roche injectée en tous sens.

La répartition des minerais dans le filon, *suivant sa direction* et non plus

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en coupe transversale, n'est pas partout la même ; les teneurs sont variables d'un point à un autre. Il semble que le minerai soit réparti en paquets, en lentilles, en poches plus ou moins importantes, séparés par des intervalles stériles. Aussi la coupe longitudinale d'un filon montre-t-elle un aspect plus ou moins tigré ; les plans de mines mettent bien ces amas en évidence, car le réseau des galeries y est beaucoup plus développé (fig. 25).

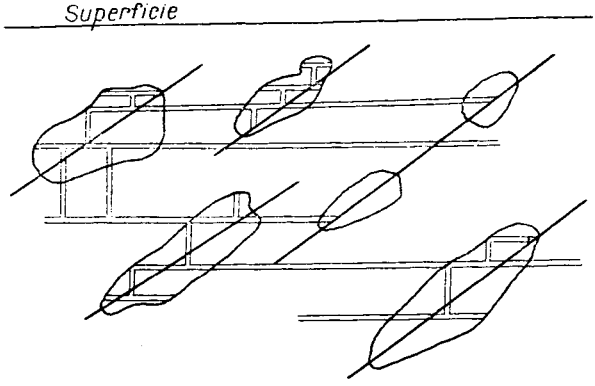


Fig. 25. — Coupe verticale d'un filon plombifère montrant la localisation des minerais.

Ces poches ont une tendance à l'orientation ; les mineurs anglais les appellent « shoots » et pensent que, quand on a reconnu la direction de l'une d'elles, on a avantage à chercher les autres dans la même direction.

7. Les variations des gisements en profondeur. — Les altérations en rapport avec la superficie actuelle. — Les variations qu'on observe dans les gisements lorsqu'on les suit en profondeur (variations dans la nature et dans la teneur), tiennent, ou à l'origine de ces gisements, ou à des altérations postérieures à leur formation. C'est surtout dans les filons qu'on les rencontre et, en particulier, les variations originelles ne peuvent guère exister que pour les filons.

A. Variations originelles. — Elles sont difficilement observables et assez mal fixées ; on les a confondues très souvent avec les variations dues aux altérations postérieures et nos investigations minières ne sont pas poussées assez loin en profondeur pour que nous soyons suffisamment renseignés à ce sujet.

Outre certaines variations accidentelles et locales qui peuvent résulter de la rencontre de fractures transversales, du passage d'un filon d'une roche dans une autre, de l'intersection d'une fahlbande, de modifications dans les dimensions de la fracture filonienne, etc., il en est d'autres, assez mal expliquées, qui semblent plus constantes et ont été parfois attribuées à des différences dans la température, dans la pression, dans l'action oxydante de l'air, en rapport avec le voisinage de la surface à l'époque du remplissage. Mais ces diverses explications semblent erronées dans la majeure partie des cas : beaucoup de modifications sont manifestement

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en relation avec la circulation des eaux souterraines, et de plus, le filon ayant cristallisé à une profondeur tout à fait différente de celle où on l'observe aujourd'hui — du fait des érosions successives —, il n'y a pas lieu d'invoquer le voisinage de la surface actuelle pour expliquer les variations originelles.

On est d'autant plus embarrassé pour établir des lois au sujet de ces variations primitives que les profondeurs atteintes dans presque tous nos filons sont très faibles (un kilomètre au plus) et que les résultats en bien des cas sont contradictoires. D'autre part, l'appauvrissement du filon en profondeur n'est quelquefois qu'une apparence due au fait qu'à richesse constamment égale, un gîte devient progressivement inexploitable à mesure que l'on s'enfonce, puisque les frais augmentent, et, par suite, passe pour s'appauvrir.

En réalité, les variations originelles sont beaucoup plus restreintes qu'on ne le croyait et difficiles à mettre en évidence.

Dans les *filons stannifères*, on a parfois observé que l'étain s'y rencontrait en profondeur et le cuivre en surface. Ainsi à Dolcoath (Cornouailles), l'exploitation a produit du cuivre jusqu'à 270 mètres ; puis de 270 à 300 mètres, on a trouvé ensemble le cuivre et l'étain ; enfin, au-dessous de 300 mètres, le cuivre a disparu et l'étain seul a substisté. Généralisant le phénomène, on pouvait être tenté de supposer que les chlorures d'étain avaient commencé à cristalliser en profondeur et n'avaient pu dépasser un certain niveau théorique, tandis que les sulfures de cuivre associés seraient montés plus haut.

Une autre explication proposée était basée sur le fait que la modification se produit quand on passe du granite dans le schiste. En réalité, le niveau selon lequel disparaît la cassitérite ne coïncide que localement avec la surface de contact du granite et du schiste. Dans d'autres cas on a constaté une succession inverse et on a exploité, d'abord de l'étain, puis du cuivre (ainsi en Saxe) ; ou bien on a observé des alternances des 2 métaux (en Cornouailles). Pour les variations de ces filons stannifères, il n'est donc pas possible de tirer de conclusion absolue.

Au sujet des *filons plombeux*, on a cru constater un appauvrissement et même une disparition de la galène quand on s'enfonce. Ces filons, en effet, arrivent quelquefois (Espagne) à se coincer, et à disparaître en profondeur d'une façon qui paraît définitive et cela tous dans la même région, vers la même profondeur. Ce qui conduit à penser que l'on atteint là l'extrémité de la zone tectonique affectée par les filons. Mais cela peut n'être qu'une apparence. Quand le filon se coince, on arrête en général l'exploitation. En réalité, le coincement peut correspondre à une simple interruption du gisement, analogue à celles qu'on observe en direction (voir fig. 25). Et si, au lieu de suspendre l'exploitation, on continuait à s'enfoncer, il est probable qu'après une zone stérile, on rencontrerait à nouveau des zones riches. Ainsi à Przibram et dans le Harz, il y a eu une recrudescence de richesse après une zone appauvrie.

Quant au *Mercure*, dans les filons plombo-argentifères du Mexique, il disparaît très vite à une faible distance de la surface.

Ce n'est qu'en comparant des gisements de régions très diverses correspondant vraisemblement d'après leur tectonique à des profondeurs

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

originelles différentes, qu'on peut établir un certain *ordre théorique de précipitation*, qui, de la base au sommet, est en gros :

Etain : — Cuivre : — Zinc : — Plomb ; — Mercure.

B. VARIATIONS POSTÉRIEURES. — Nous sommes mieux renseignés au sujet des remises en mouvement, postérieures à la formation des gisements. Elles sont indiscutables et très nettes. Elles peuvent d'ailleurs remonter à des époques diverses.

1. Dans la phase qui a suivi immédiatement la formation d'un filon, les *eaux thermales ascendantes*, qui ont continué à circuler avant que le filon ne fût complètement obstrué, ont pu introduire des modifications dans la constitution originelle. Elles ont pu réagir chimiquement sur le produit des précipitations antérieures. Et, si leur composition, leur température, leur pression étaient différentes de celles des eaux qui avaient antérieurement déposé le minerai, celui-ci a pu se redissoudre, être *transporté de bas en haut* et se précipiter à nouveau dans une zone favorable, après concentration connexe. Il a pu en résulter des remaniements de certains métaux.

Ces phénomènes ont dû se réaliser plus facilement encore lorsqu'une eau thermale a recommencé à circuler dans la réouverture d'un ancien filon. Cette eau chaude, à minéralisation généralement faible, et, en tout cas, différente de la minéralisation primitive, était particulièrement apte à provoquer de semblables déplacements de bas en haut.

Mais c'est surtout dans la zone où les eaux froides superficielles venaient se mélanger avec les eaux thermales, les diluer et les refroidir, que se sont produits les phénomènes de reprécipitation. L'argent, le cuivre, le mercure ont pu ainsi se concentrer au voisinage de la surface.

2. Ces phénomènes se sont combinés avec *l'action des eaux superficielles* qui est la plus générale et de beaucoup la plus importante, soit à l'époque actuelle, soit même aux époques anciennes et qui se rattache à la question des eaux souterraines. Mais, plus on remonte dans le passsé, moins il y a de chances pour que des phénomènes continentaux comme ceux-là puissent s'observer. La plupart de ceux que l'on constate et dont l'influence pratique est tout à fait essentielle sont donc d'un âge très récent.

Nous avons vu qu'on appele *surface hydrostatique* une surface selon laquelle se séparent une zone supérieure où les eaux d'infiltration superficielle sont toujours en mouvement et une zone inférieure où les eaux sont presque permanentes et imprègnent les terrains sans se renouveler sensiblement. Cette surface XY (fig 26) épouse en les atténuant les détails de la topographie superficielle. Elle varie et se déplace légèrement. Mais ce n'est pas forcément une surface continue, en particulier dans les calcaires où l'eau ne remplit que certains vides, certaines fissures du terrain.

Lorsqu'un gisement métallifère, un filon par exemple est coupé par la surface hydrostatique, il se trouve, de part et d'autre de ce niveau, dans des milieux bien différents. Au-dessous, les eaux permanentes sont débarrassées de leurs sels et de leur gaz ; elles sont à une température constante : ce sont des *eaux inertes* au point de vue chimique. Au-dessus, les eaux venant de la surface se renouvellent sans cesse, chargées d'oxygène, d'acide carbonique, de sels très divers (chlorures, sulfates, etc.) : ce sont

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

des *eaux actives*, qui réagissent sur les minerais et leur font subir des transformations.

Au voisinage même de la surface du sol, les chlorures des eaux donnent vite des chlorures métalliques insolubles qui se précipitent ; l'oxygène transforme les sulfures métalliques en sulfates, qui, s'ils sont solubles, peuvent être éliminés ou entraînés vers la profondeur, ou qui, s'ils sont insolubles, se peroxydent sur place. Ainsi se constitue *la zone de peroxydation* caractérisée par l'existence de sesquioxyde de fer et de chlorures et par la concentration de diverses matières.

Plus bas, les eaux contiennent encore de l'acide carbonique capable de réagir sur les sulfures : ceux-ci donnent, en présence de l'oxygène et de CO^2, des sulfates et finalement des carbonates. Cette zone, dite *zone de cémentation*, est, en même temps, une *zone de concentration chimique*, dans laquelle se précipitent les sulfates solubles (Cu, Ag) provenant de la zone superficielle, ainsi que les métaux remontés par les eaux chaudes ascendantes. De ce fait, les sulfures s'enrichissent en cuivre, argent, etc., tandis que la proportion d'arsenic d'antimoine, de molybdène etc... s'accroît. C'est là que l'on rencontre les minerais à haute teneur accumulés parfois en grandes poches (bonanzas).

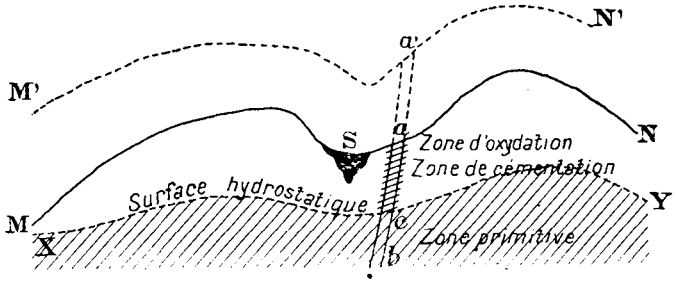


Fig. 26. — Coupe verticale montrant l'influence des altérations superficielles sur un filon.

Nous distinguerons donc 3 zones d'inégale importance ; ce sont à partir de la surface :

1° La *zone d'oxydation*, au contact de l'air et où domine l'action de l'oxygène ;

2° La *zone de cémentation et de concentration chimique*.

3° La *zone profonde* primitive, au-dessous du niveau hydrostatique, où l'on retrouve les sulfures non altérés.

Parfois, par suite des fluctuations antérieures du niveau hydrostatique, il arrive que les minerais de cémentation subsistent quelque temps au-dessous de ce niveau. D'autre part, la superficie est toujours au-dessous de la superficie ancienne M'N' et toute une portion du filon *a'a*, complètement enlevée par l'érosion, a contribué à la minéralisation de la zone *ac*.

Enfin 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. Les

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

réactions y sont plus complètes et s'y traduisent par des formes minéralogiques différentes souvent de celles que l'on retrouve en terrains inertes.

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.

Cas du fer. — α) Supposons un *gisement pyriteux ab* (fig. 26) encaissé *dans des terrains inertes* autres que du calcaire. Au-dessus du niveau hydrostatique, les eaux produisent des phénomènes d'oxydation ; le sulfure est transformé en sulfate, puis en sesquioxyde de fer. Il en résulte un changement brusque par rapport à la surface hydrostatique : au-dessus, de l'*oxyde de fer*, au-dessous, de la *pyrite*.

D'autre part, la pyrite qui se trouvait en *aa'*, transformée en sulfate de fer, a été enlevée par l'érosion ou bien entraînée vers la profondeur par les eaux d'infiltration et redéposée entre *a* et *c* : il y a donc eu, dans ce cas, un *enrichissement* de la zone située au-dessus du niveau hydrostatique.

En outre, les eaux ont tendance à élargir la partie haute du filon et à y développer un *chapeau de fer* (Eisenhut) constitué par de l'hématite et qui peut avoir 25, 30, 40 mètres et plus d'épaisseur. Le développement du chapeau de fer donne de précieuses indications sur l'importance du gisement sous-jacent ; « un filon qui a un beau chapeau est un beau filon ».

Enfin il arrive qu'une partie de l'oxyde de fer peut être entraînée plus ou moins loin du gisement originel et se déposer dans des creux du terrain, y formant une sorte de sédiment ou des poches ferrifères (en S ; fig. 26).

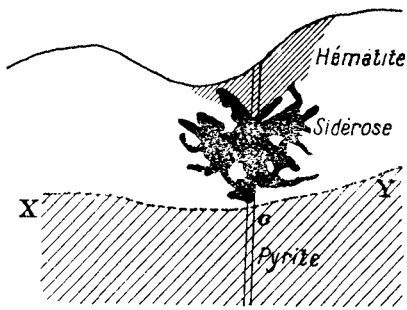


Fig. 27.

Le phénomène est déjà assez complexe.

β) Supposons le même *gisement-pyriteux* encaissé dans des *calcaires* (fig. 27).

Cette fois, l'action de CO^2 devient prédominante et il y a formation de carbonate de fer au-dessus du niveau hydrostatique XY. Ce carbonate (*sidérose*), plus que l'oxyde de fer dans le cas précédent, a pu s'écarter du gisement primitif, s'insinuer dans les cassures, donner tout un réseau de veines (stockwerk) englobant des noyaux stériles de calcaire. Le gisement s'est donc considérablement élargi. Le carbonate n'est, d'ailleurs, qu'un stade intermédiaire qui tend à se transformer en sesquioxyde, forme plus stable.

En outre, plus en surface, les eaux ont produit une zone d'*oxyde de fer* qui a englobé tout le calcaire. Nous avons donc, dans ce cas, *les 3 zones* d'oxydation, de cémentation et primitive, qui sont loin d'avoir la même valeur. La zone d'oxydation renferme un très bon minerai de fer et il s'y est concentré en même temps du manganèse. La zone de cémentation contient de la sidérose, minerai de second ordre, qu'il faut commencer par griller, mais c'est encore un minerai pur, non phosphoreux. Quant à la

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

zone primitive, son minerai (pyrite) est à peu près inutilisable (sauf pour la fabrication de SO^4H^2 quand la pyrite est suffisamment pure) : il y a donc appauvrissement du gisement en profondeur.

γ) Supposons que le gisement primitif soit constitué par du *carbonate de fer*. Deux zones seulement vont exister après altération : au voisinage de la surface, de l'*oxyde de fer* : en profondeur, du *carbonate*.

Toutes ces transformations ne sont pas toujours d'une netteté absolue. A la base de la zone de cémentation, la sidérose peut renfermer encore un peu de pyrite non transformée et surtout de la galène et de la blende, s'il y en a dans le gisement. C'est là une gêne dans l'exploitation du fer.

Dans la chaîne pyrénéenne par exemple, on trouve, dans les hautes parties de la chaîne où le niveau hydrostatique est très bas, uniquement de l'hématite (l'altitude en rendant souvent l'extraction presque impossible). En descendant vers le fond des vallées, on rencontre ensemble l'oxyde et le carbonate, celui-ci passant à la pyrite vers le bas. Mais le fait dominant est le passage de l'oxyde au carbonate (à Bilbao). Enfin, au niveau des vallées actuelles, il y a surtout passage du carbonate à la pyrite : le minerai de fer y est salí par la présence du soufre et de métaux étrangers ; indice d'un gisement sulfuré complexe.

Cas du manganèse. — Des faits semblables s'observent pour le manganèse. On constate toujours la disparition du manganèse en profondeur, tandis que tous les phénomènes d'altération accentuent sa teneur dans la zone superficielle, le métal étant d'ailleurs peu entraîné par les eaux de ruissellement. C'est dans cette zone qu'existent les minerais riches ; l'altération simultanée du fer et du manganèse détermine toujours un enrichissement relatif en manganèse. (De même qu'il y a concentration de la magnésie par rapport à la chaux et transformation du calcaire en dolomie.)

Nous rencontrons donc en surface la *pyrolusite* ou la *psilomélane* ; en s'enfonçant, le manganèse disparaît pour faire place à la pyrite . Si le gisement se trouve en terrains calcaires, on aura de l'*oxyde de* manganèse dans la zone d'oxydation, puis du carbonate (*diallogite*) dans la zone de cémentation et enfin disparition du manganèse dans la zone profonde.

En outre, le manganèse, dans des terrains qui en renferment des traces infimes, tend à constituer des enduits bioxydés superficiels (dendrites) : des roches, comme des elvans, contenant seulement 0,3 % de Mn, arrivent à se couvrir rapidement d'une couche noire sur leurs faces de cassure.

Cas de l'or. — La pyrite est assez souvent aurifère ou cuprifère. Qu'advient-il si le gisement pyriteux est en même temps aurifère ?

Dans la zone superficielle se forme encore, aux dépens de la pyrite, de l'hématite contenant des grains d'*or natif*. Le quartz qui renfermait la pyrite aurifère prend un *aspect rubéfié et carié* : il montre les tons rouillés de l'oxyde de fer et apparaît criblé de petites cavités correspondant à des cristaux de pyrite disparus ; en même temps, l'or, que ces cristaux contenaient en association peu soluble, se dépose fréquemment en fines particules à l'état natif dans ces cavités. Plus le quartz est caverneux, rubéfié, plus il a de chances d'être aurifère : c'est l'aspect que les mineurs appellent « good looking ». Donc, depuis la surface du sol jusqu'au niveau hydrostatique, l'or sera à l'état natif et pourra être traité par l'amalgamation.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Au-dessous du niveau hydrostatique subsistera la pyrite aurifère qui ne peut guère être traitée que par la cyanuration et la chloruration. Dans le cas présent on passe généralement de la zone peroxydée à la zone pyriteuse sans l'intermédiaire d'une zone de cémentation.

En outre, au-dessus de la surface hydrostatique, il y a *enrichissement en or* ; il s'y est rassemblé une partie de l'or provenant des régions supérieures du gisement, qui se trouvaient autrefois au-dessus de la surface topographique actuelle et qui ont été enlevées par les érosions. C'est dans la zone de cémentation proprement dite que l'enrichissement s'accentue.

Cette concentration de l'or est donc un phénomène postérieur dû aux remises en mouvement. Le fait peut paraître contradictoire avec certaines notions de chimie : l'or passe habituellement pour insoluble ; mais, pour certaines substances réputées insolubles (or, barytine, fluorine, galène, cassitérite), il faut tenir compte de la solubilité dans des liqueurs salinês, très étendues, même à faible teneur, agissant pendant un temps très long. Des expériences de laboratoire ont d'ailleurs montré la solubilité de l'or : on a reconnu sa présence dans l'eau de mer ; Egleston a essayé de mettre l'or en présence de divers réactifs pendant un temps très long dans des tubes ouverts ou dans des tubes scellés, à des températures et pressions diverses : il constata la réaction de l'or dans du chlorure de sodium additionné d'une goutte d'acide azotique, en tube scellé ; dans le nitrate d'ammoniaque mêlé de chlorhydrate d'ammoniaque, en tube ouvert ; au bout de 4 mois, dans une eau alcaline chargée de matières nitreuses ; il réalisa aussi la précipitation de l'or sur de la tourbe, en petites masses comparables à des pépites.

La dissolution de l'or a encore pour effet de « nourrir » certains cristaux d'or déjà formés. On trouvera donc l'or en plus gros cristaux dans les zones superficielles, parfois en magnifiques cristallisations. Et, si ces zones donnent ensuite naissance à des placers, ceux-ci contiendront des cristaux d'or assez gros et même de grosses pépites très peu roulées, étant donné la proximité de ces placers par rapport au gisement originel.

Dans l'ensemble, tous les gisements d'or montrent un *appauvrissement du minerai en qualité et en quantité, en profondeur, au-dessous de la surface hydrostatique.*

Cas du cuivre. — Les altérations superficielles prennent, dans le cas du cuivre une importance pratique tout à fait considérable et la plupart des gisements à haute teneur leur sont attribuables.

La forme originelle des minerais de cuivre, celle qui persiste en profondeur, au-dessous du niveau hydrostatique, c'est de la pyrite cuivreuse (tenant 2 à 3 % de cuivre) et, plus rarement, de la chalcopyrite.

On commence, dans la *zone d'oxydation*, par avoir de l'oxyde de cuivre (*cuprite*), accompagné de *cuivre natif* si des actions réductrices se sont exercées, soit au contact des matières organiques, soit par action de grains de magnétite (Lac Supérieur). En outre, si le gisement est encaissé dans des calcaires, on y rencontre des carbonates de cuivre (*malachite* et *azurite*) : c'est dans ce cas que la zone d'oxydation prend une véritable valeur pratique. Ces minerais sont associés avec les oxydes de fer et parfois avec des

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

formations argileuses rougeâtres résultant éventuellement de la décalcification du calcaire encaissant. Dans l'ensemble, ce sont des minerais d'assez forte teneur, mais difficiles à traiter, surtout s'il s'est produit une concentration simultanée de la silice. La zone d'oxydation se caractérise par ses colorations vives (*colorados*).

Plus bas on passe dans la zone *de cémentation*. C'est la plus riche : les minerais y sont parfois à haute teneur (50-60 % de cuivre). Cet enrichissement tient à ce que cette zone de cémentation a absorbé et concentré peu à peu de grandes quantités de cuivre empruntées aux parties plus élevées du filon aujourd'hui disparues par l'érosion, le cuivre ayant été entraîné, à l'état de sulfate, par un mouvement descendant des eaux. Ces minerais enrichis sont les *cuivres gris* résultant de la combinaison avec l'arsenic ou l'antimoine, la *chalcosine*, *l'érubescite*, la *chalcopyrite* (les « *Pavonados* » du Pérou). En même temps, si l'on est en terrain calcaire, le fer peut avoir donné de la sidérose ; d'où le groupement classique : sidérose ou hématite et cuivre gris. Tous ces minerais riches sont destinés à disparaître très vite ; de là cette loi générale que les filons de cuivre gris s'épuisent en profondeur, où l'on retrouve la pyrite de fer cuivreuse. L'exploitation des gisements de cuivre gris expose donc à des déboires.

La limitation profonde de la zone de cémentation manque souvent de netteté et l'on voit les enrichissements qu'elle provoque se continuer parfois, jusqu'à plusieurs centaines de mètres de la superficie, par veines discontinues qui s'effacent, l'une après l'autre, amenant une diminution progressive de la teneur en cuivre.

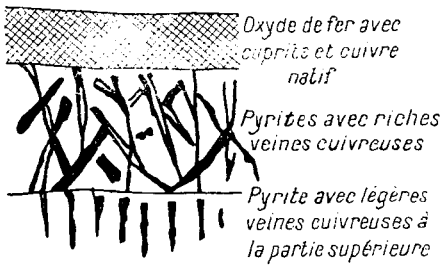


Fig. 28.

En outre, les phénomènes d'altération sont plus ou moins achevés. La transformation est complète dans le cas de filons minces ; mais, s'il s'agit d'un amas volumineux de pyrite cuivreuse, celle-ci n'est pas entièrement transformée : les parties altérées forment un réseau de veines cuprifères enrichies, au sein d'une masse pyriteuse inaltérée. La zone d'oxydation sera formée d'un chapeau de fer de 20-25 mètres d'épaisseur avec un peu de cuivre natif et de cuprite : ce n'est pas une zone de grande valeur. Au-dessous nous rencontrerons la pyrite avec de riches veines de cuivre gris, de chalcosine, de chalcopyrite. La zone profonde se composera de pyrite avec de légères veines cuivreuses à la partie supérieure (fig. 28).

Ce sont les veines, enrichies en cuivre de la zone de cémentation, que les Romains ont soigneusement exploitées par de petites galeries très étroites

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

et qu'ils ont vidées dans toutes les mines anciennes (Rio Tinto). Mais ils se sont généralement arrêtés au niveau hydrostatique, ne disposant que de moyens insuffisants, comme la roue à augets, pour épuiser l'eau des mines. Ils ont donc laissé subsister,au-dessous de ce niveau, la pyrite que les variations de la surface hydrostatique avaient légèrement enrichies en cuivre à sa partie supérieure.

Cas de l'argent. — Dans les filons d'argent on constate des altérations semblables à celles des filons cuprifères et aussi nettes.

Dans la *zone d'oxydation*, en surface, on trouve, au milieu d'argiles terreuses chargées d'oxyde de fer (ocres), de l'*argent natif* accompagné de *chlorures* (cérargyrite), *bromures*, *iodures*, etc., quand les eaux salines sont intervenues dans l'altération, et d'un peu de *sulfure* (argyrose). Ce sont les *métales calidos*, facilement amalgamables (métaux chauds).

A l'oxyde de fer peuvent s'associer les oxydes de manganèse (noirs), les oxydes ou carbonates de cuivre (colorations vertes et bleues caractéristiques), la galène inaltérée ou enduite de cérusite, la calamine. Cette zone d'oxydation est généralement appauvrie en argent, une partie de celui-ci ayant pu être entraînée au dehors ou reprécipitée plus bas.

Quand on s'enfonce, on arrive à la *zone de cémentation* (bonanzas) qui peut atteindre 500 mètres de hauteur ; elle est surtout riche au Mexique et dans les Andes, en raison de la grande profondeur des vallées et de l'abaissement corrélatif du niveau hydrostatique. D'importants phénomènes de concentration s'y sont produits par poches ou par grandes chambres très riches (Névada, Mexique, etc.). C'est la zone des *métales frios* (métaux froids) difficilement amalgamables : d'abord les sulfures, ou *argyrose*, (mulatos), puis les sulfoarséniures et les sulfoantimoniures : *argents rouges* et *argents noirs* (negrillos), avec un peu d'argent natif. Tous ces minerais sont associés d'ordinaire aux minerais cuprifères de la zone de cémentation (pavonados).

Les phénomènes d'altération cessent quand on dépasse sensiblement le niveau hydrostatique. On retrouve alors les sulfures complexes. L'argent est incorporé dans les *galènes* et les *blendes*, minerais plus pauvres et plus difficiles à traiter. La teneur s'abaisse de 9-10 kilogrammes à la tonne à 800 gr.-1 kilogramme à la tonne environ. Il en résulte souvent l'arrêt des mines au niveau hydrostatique, d'autant plus que le début des faibles teneurs coincide avec le commencement des difficultés d'épuisement, insurmontables autrefois. Aujourd'hui il est parfois possible d'exploiter ces parties profondes, où l'on a l'avantage de rencontrer des quantités énormes de minerai vierge dont aucune exploitation ancienne n'a écrémé le gisement, comme il arrive dans les parties hautes.

Cas du plomb et du zinc. — Un grand nombre de filons sont des filons B. P. G. (Blende, Pyrite, Galène).) Nous avons déjà vu les formes d'altération de la pyrite. Pour la blende, on constate une certaine tendance à l'oxydation en surface, mais tendance moins prononcée ; la blende donne naissance à de la *calamine* (carbonate + silicate).) Le phénomène s'accentue considérablement en milieu calcaire. Dans ce cas, le filon de blende, primitivement limité, s'élargit dans la partie haute. Il se forme des stockwerks de calamine qui ne tardent pas à constituer un véritable amas avec phéno-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

mènes de substitution au calcaire. La calamine commence d'habitude par être rouge en surface (calamine ferrugineuse) et mélangée de terres calaminaires, puis elle devient blanche en profondeur dans la zone de cémentation, pour faire place à la blende inaltérée dans la zone primitive. La calamine est préférable à la blende et ne nécessite pas de grillage comme celle-ci.

Quant à la galène, peu soluble, elle subsiste presque inaltérée jusqu'à la surface. Toutefois, surtout en terrains calcaires, elle a pu se transformer partiellement en carbonate (*cérusite*), recouvrant la galène d'un enduit ou disséminé en petits cristaux dans une ocre, et en sulfate (*anglésite*) ; en outre, des traces de phosphore, arsenic, molybdène, contenues dans le filon ou dans les terrains encaissants, ont pu donner un peu de *pyromorphite*, *mimétèse*, *wulfénite*.

En général, on trouvera, en surface d'un affleurement plombeux, quelques gros cristaux de galène répartis dans un quartz rubéfié et carié, avec de rares produits d'altération plombeux. Puis, plus bas, la proportion de galène augmentera, le plomb n'étant accompagné de presque aucun autre métal. En terrains calcaires, il y aura en outre altération partielle de la galène en cérusite.

Les Anciens ont beaucoup exploité la galène pour sa teneur en argent et ils méprisaient le zinc ; presque toujours ils se sont arrêtés aux amas calaminaires superficiels où existe peu de galène ; mais quand on s'approfondit, on s'apercoit que, sous l'amas, la galène reparaît avec association de la blende (en Algérie).

Altérations anciennes. — Tous les phénomènes d'altération superficielle que nous venons d'étudier sont essentiellement en rapport avec la superficie *actuelle*. Si l'on imagine que l'érosion se continue en abaissant la superficie actuelle, son seul effet doit être de détruire la partie haute de la zone altérée et, s'il y a creusement des vallées, d'abaisser le niveau hydrostatique, donc de faire descendre verticalement la zone de cémentation. Cependant, on imagine aisément que des phénomènes du même genre ont dû se produire dans toute la suite des temps depuis l'époque de l'incrustation du filon, en rapport avec des superficies qui se sont constamment déplacées et que les érosions ont en principe abaissées, mais que des mouvements tectoniques ont pu au contraire relever. Seulement, dans la très grande majorité des cas, tout ce qui se rapporte à de telles manifestations continentales datées d'époques antérieures à la nôtre, a été détruit et nous est par suite inconnu. Il a fallu des circonstances exceptionnelles pour qu'une ancienne zone d'altération superficielle nous ait été conservée, comme les ruines antiques d'un Pompéi ou d'un Herculanum, dans une fosse d'affaissement à allure synclinale, où de semblables minerais altérés se sont trouvés ramenés en profondeur avec les terrains encaissants et, par suite, pendant longtemps préservés contre l'érosion par une sorte de momification, jusqu'au jour où les érosions de l'époque actuelle les ont fait reparaître au jour.

Peut-être faut-il expliquer par un phénomène de ce genre la persistance paradoxale en de certaines mines, jusqu'à de grandes profondeurs, de minerais qui sont pour nous des minerais altérés, tels que le cuivre natif du Lac Supérieur, l'argent natif de Kongsberg, ou même les pyromorphites et wulfénites de filons de plomb espagnols.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

8. Gîtes sédimentaires. — Ils sont dûs aux remaniements des gisements de formation primaire. On peut les diviser en deux groupes : ceux qui sont simplement détritiques et ceux qui, en outre, résultent de réactions chimiques et de phénomènes de dissolution et de reprécipitation.

A) GISEMENTS DÉTRITIQUES. — Le procédé employé par la nature est le même que celui qui est utilisé dans nos usines : quand le minerai est mélangé à sa gangue, on le concasse, puis on le lave pour séparer les minéraux de densité différente. Ces opérations se sont faites naturellement dans beaucoup de cas, en particulier pour les *gemmes* (les gisements de cette sorte ont été longtemps les seuls gisements diamantifères ; ils sont encore les seuls où l'on exploite le rubis et le saphir), pour l'*Or*, le *Titane*, le *Bismuth*, la *Magnétite*. Par suite de leur nature superficielle, ces gisements détritiques ont joué dans la métallurgie ancienne un rôle considérable qui tend à s'atténuer aujourd'hui au fur et à mesure que l'on découvre et qu'on exploite des gîtes d'une autre nature. Cependant on a pu reprendre des gisements de sables à magnétite. L'extraction de l'étain alluvionnaire est encore florissante ; mais, au fur et à mesure de son épuisement, on s'adressera de plus en plus aux filons. De même pour l'or, les alluvions s'épuisent peu à peu ; on doit aller le chercher dans des pays nouveaux : ce qui a fait dire qu'à toute époque, l'or est venu des confins de la civilisation. Aujourd'hui la production de l'or alluvionnaire diminue très rapidement. De même, celle du diamant alluvionnaire. Malgré la disparition progressive des gisements de cet ordre, leur importance reste notable.

L'époque à laquelle s'est faite cette concentration mécanique naturelle, peut être absolument quelconque. Cependant, ceux qui viennent d'époques très anciennes sont rarement conservés comme tous les phénomènes continentaux.

En fait de gisements anciens, on a cité l'exemple des conglomérats aurifères à galets roulés du Dakota : mais les galets d'or roulés qu'on y a signalés sont probablement accidentels et peut être mal observés. On a cité aussi les conglomérats du Witwatersrand ; mais l'origine détritique de leur or est plus que problématique. En Australie, on peut observer des formations aurifères détritiques dans le Carbonifère. Elles peuvent y être datées ; de nombreux filons recoupent le Dévonien et le Carbonifère inférieur et on voit apparaître dans le Carbonifère supérieur des grains d'or d'origine détritique. Dans la même région, on connaît, au Jurassique, des alluvions aurifères qu'on peut même suivre vers le littoral où elles se transforment en alluvions marines. On en connaît aussi de l'époque miocène.

Les conglomérats à galets roulés de galène existent en certains points ; mais ils sont rares, car les cristaux de galène se clivent et s'effritent trop facilement ; pour que le phénomène puisse être observé, il faut la proximité immédiate d'un rivage. On en connaît plusieurs cas discutables ; un seul paraît net, celui du cap Garonne près de Toulon. Un conglomérat du Permien y contient de véritables galets de Galène ; ceux-ci ont dû être arrachés aux filons qui, dans cette région, sont d'âge anté-permien, probablement antérieurs au Carbonifère supérieur. Tous ces cas, se rapportant à des époques anciennes, n'ont guère de valeur industrielle.

Mais les gisements détritiques intéressants se rencontrent surtout pendant le cycle de creusement qui s'est terminé à l'époque actuelle, qui a pu

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

commencer suivant les régions au Miocène, au Pliocène et au Pléistocène, et qui a été prépondérant pendant le Pléistocène.

On peut distinguer les éluvions et les alluvions.

a) *Eluvions*, gisements détritiques formés presque sur place sans véritable déplacement par les cours d'eau. Un simple *éboulis* donnera une éluvion, rarement intéressante, exploitée cependant dans quelques cas particuliers pour fer, fer chromé, étain (Mount Bischof en Tasmanie). On trouve parfois, à la base de pentes montagneuses, des éluvions composées de débris rocheux volumineux ayant subi une grossière préparation mécanique ; le minerai s'est seulement séparé de sa gangue, dont les éléments les plus légers ont pu être entraînés par le ruissellement.

Une préparation mécanique semblable peut avoir été produite aussi par un glacier, dont la *moraine* a été alimentée par des débris de filons métallifères. Mais, dans ce cas, il y a eu généralement mélange de l'action glaciaire et de l'action fluviale, surtout aux périodes intermédiaires, et les caractères de la préparation glaciaire en sont souvent altérés. Cette origine morainique a été proposée pour divers gisements de l'Alaska, de la Terre de Feu, de la haute chaîne des Andes, pour des gîtes aurifères du Turkestan (très douteux).

b) *Alluvions*, gisements formés par l'action des phénomènes fluviatiles. Elles se sont surtout formées dans des cours d'eau, ayant eu une extension et une force plus grandes que ceux de l'époque actuelle. Elles peuvent être à nu ou avoir été recouvertes ultérieurement par des dépôts stériles ou par des coulées de basalte qui les ont préservées de l'érosion. Ces gisements remontent surtout aux époques miocène, pliocène, pléistocène. Les premières alluvions se sont formées sur les hauts plateaux, où l'on a pu souvent déterminer l'emplacement du réseau hydrographique du début du Pliocène, tout à fait différent du réseau actuel. Plus tard elles forment des niveaux étagés, produits au fur et à mesure du creusement des vallées jusqu'à l'époque actuelle. Aujourd'hui certains cours d'eau roulent encore de l'or qui va se concentrer en des points privilégiés, îles, baies, etc. (Rhin etc.)

Ces alluvions métallifères (Au, Sn, Pt) obéissent à certaines lois dont il a déjà été question dans l'étude des phénomènes actuels.

Les métaux ont été transportés à une *distance très faible* de leur gisement originel. Les observations et les expérimentations ont montré que 2 à 3 kilomètres étaient un maximum, sauf pour quelques parcelles extrêmement ténues d'or (*floating Gold*) qui peuvent être transportées à des distances considérables. On a cru longtemps que les métaux natifs des alluvions pouvaient venir de très loin ; cela tenait à ce qu'on ne s'était pas rendu compte que des gisements originels pauvres pouvaient produire des alluvions riches. En réalité, l'alluvion se produit presque sur place, à peu de distance du gisement originel.

L'or est généralement localisé à la base des alluvions ; c'est immédiatement au-dessus du *bed-rock* que l'on trouve la couche la plus riche, surtout quand le *bed-rock* est constitué par des schistes dont les rugosités retiennent les paillettes d'or et jouent le même rôle que la peau de mouton des orpailleurs du Turkestan. Ce fait de la localisation de l'or à la base des alluvions doit être expliqué. On avait pensé que l'or plus lourd avait dû

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

tomber au fond ; ce serait concevable si toutes les alluvions s'étaient formées d'un coup ; mais, comme cela n'est pas, il est impossible d'expliquer ainsi que l'or, apporté par exemple 2.000 ans après la formation de la base des alluvions, y soit descendu.

On a parlé également d'une descente postérieure de l'or dans des terrains meubles. Ce fait, admissible dans certains cas, comme intervention accessoire, ne l'est pas comme cause principale. Les alluvions contiennent toujours, en effet, des filets argileux, qui auraient arrêté la descente. Il y a parfois enrichissement le long de ces filets argileux, mais c'est un phénomène local et exceptionnel.

Il arrive aussi dans certains champs alluvionnaires qu'il existe une seconde couche aurifère au-dessus du *bed-rock* et même une troisième.

Cette seconde couche repose sur une deuxième couche de galets. Dans ce cas elle ne peut être expliquée par le phénomène de descente progressive.

Il est plus probable que, quand le *bed-rock* s'est formé, il y avait, à la surface du sol, des affleurements filoniens ayant subi une longue altération sur place et relativement riches. Ce sont les produits de leur démantèlement qui se sont déposés les premiers, à la base des couches alluviales. Par la suite, les gisements sont devenus plus pauvres et les alluvions aussi. Il y a, d'ailleurs, eu probablement une phase assez longue pendant laquelle les gisements se sont maintenus riches ; mais il faut en outre tenir compte de ce fait que des phénomènes secondaires ont pu, dans une certaine mesure, amener l'or à descendre, et cela d'autant plus facilement qu'il était plus fin. On sait, en archéologie, que des médailles ont pu descendre à travers les terrains.

Les graviers aurifères se présentent sous deux états : les *graviers rouges* (*red gravels*) superficiels, teintés par de l'oxyde de fer ; les *graviers bleus* (*blue gravels*) dont la couleur est due à de la pyrite à peine altérée. Comme la pyrite de nos cours d'eau actuels est presque toujours oxydée, on peut penser que ces alluvions bleues se sont déposées dans des eaux profondes, ou plutôt que la pyrite y résulte d'une recristallisation.

Le même phénomène de recristallisation a dû se produire pour l'or ; car l'or alluvionnaire est toujours plus volumineux que celui des gisements originels. De plus les pépites d'or sont souvent si finement cristallisées qu'il est impossible d'admettre qu'elles aient pu être transportées. Il y a donc eu concentration de matières dans les alluvions elles-mêmes. On a pu reproduire cette cristallisation expérimentalement par l'emploi de liqueurs chlorurées ou cyanurées. Un autre argument à cet égard est le titre de l'or alluvionnaire, plus élevé que celui de l'or filonien ; le fait, souvent constaté, n'est pas à l'abri de toute critique, quoique les exemples se multiplient.

La *teneur* des alluvions aurifères est très variable ; la limite d'exploitabilité est une question purement industrielle. Actuellement, avec la méthode hydraulique, on exploite jusqu'à 0,50 franc-or par mètre cube. La teneur n'est d'ailleurs jamais très considérable, au plus quelques grammes. On a cependant trouvé des pépites d'or pesant jusqu'à 60 et 70 kilogrammes.

Gisements littoraux. — A côté des alluvions et des éluvions, les mouvements oscillatoires des vagues ont pu produire une préparation mécanique

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

et une concentration des matériaux durs et lourds sur certaines plages. Sur toutes les côtes où abondent les diabases et les mélaphyres, roches toujours riches en magnétite, celle-ci se concentre et forme de véritables *sables à magnétite*, parfois exploitables à peu de frais, faciles à embarquer et à traiter.

On connaît de même des *sables stannifères* sur les côtes de Bretagne, d'Espagne, du Portugal et quelques exemples de *sables marins aurifères*.

Les *sables diamantifères* de l'Ancien Sud-Ouest africain allemand se sont progressivement formés et enrichis par la destruction de cheminées diamantifères dont on suppose l'existence sous la mer ; du fait même de leur origine, ces diamants sont toujours petits.

B) GISEMENTS DE PRÉCIPITATION CHIMIQUE. — Les eaux qui circulent sur un gisement filonien y exercent une action destructive ; elles y dissolvent les éléments solubles (SO_4 Fe, SO_4 Cu, etc.). Dans la plupart des cas, ceux-ci sont emmenés à la mer ; mais quelquefois ils vont dans des bassins fermés où se produit la concentration des éléments dissous : sulfate de calcium, chlorure de sodium, chlorure de potassium, sels de magnésie, borates, etc., et même matières métalliques.

a) *Gisements d'évaporation saline.* — Ils sont constitués par des *lentilles salines* pouvant atteindre 300, 500, 800 mètres d'épaisseur ; on a vu précédemment qu'une telle épaisseur nécessitait une explication spéciale.

On a vu aussi *l'ordre* dans lequel se déposent ces sels, qui paraissent s'être formés dans des *lagunes fermées*, soumises probablement à un climat désertique.

L'*influence d'une barre* permettant seulement le passage des eaux peu salées par-dessus un seuil, empêchant leur retour après concentration, ne suffit pas à expliquer les faits : il est probable qu'au moment des phénomènes de plissements, des bassins d'effondrement se sont formés où les eaux s'accumulaient. De même, un *affaissement progressif* de ces bassins y permettait le dépôt d'épaisseurs considérables de sel, chaque couche étant cependant déposée sous une profondeur d'eau très faible.

b) *Gisements de matières métalliques.* — Le même phénomène a pu se produire théoriquement pour des matières métalliques, surtout pour le *fer* et le *cuivre*; mais on a souvent exagéré considérablement son rôle en l'invoquant toutes les fois qu'on a trouvé des gisements interstratifiés de sulfures de fer et de cuivre. En réalité, il faut tenir compte de la fréquence des phénomènes d'intrusion donnant des nappes à allure stratifiée dans les schistes, des réseaux métallisés dans les calcaires, des filons-couches faciles à confondre avec des sédiments proprement dits. La distinction entre les gisements réellement sédimentaires et les filons-couches a cependant une grande importance pratique ; les gisements sédimentaires peuvent se continuer sur de grandes distances ; les filons-couches sont généralement limités.

Les couches réellement interstratifiées coïncident avec certains épisodes de la sédimentation et se trouvent *à des niveaux déterminés*. Si la métallisation s'est produite sur le même point dans plusieurs étages géologiques et à tous les niveaux d'un même étage, il y a des chances pour qu'il s'agisse de filons-couches. Il en est de même, si l'on a affaire à des groupes de gisements isolés.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

La *nature du terrain encaissant* peut fournir un autre critérium. L'origine sédimentaire du minerai est peu probable s'il est réparti dans un calcaire organisé. Dans un grès on peut observer des phénomènes de sédimentation, d'ailleurs plutôt détritiques que chimiques et produits dans des conditions peu favorables. Les schistes, constitués par des éléments vaseux, déposés dans des eaux tranquilles, très chargées en matières organiques, réductrices, ont constitué un milieu favorable pour la précipitation des sulfures métalliques.

La *nature du métal* rend aussi plus ou moins plausible l'hypothèse de l'origine sédimentaire par précipitation chimique : probable pour le cuivre, moins probable pour le plomb, invraisemblable pour l'or.

Enfin, dans l'examen d'un gisement, il faut tenir compte des phénomènes de remises en mouvement ; il est rare que l'interstratification soit absolue.

Malgré ces réserves, il est certain qu'il existe des gisements sédimentaires d'origine chimique, *localisés dans certains zones géologiques* avec la même nature et les mêmes caractères. Il en est ainsi, en particulier, le long de la zone hercynienne : il s'est produit là, pendant le *Permien* et *au début du Trias*, des grès, des conglomérats, puis des schistes ; la série se termine souvent par des formations lagunaires avec gypse et sel. Les gisements métalliques se trouvent : soit dans les grès et les conglomérats, où ils sont à l'état de poussière et de nodules métalliques dispersés, soit dans les schistes, où ils sont formés par des filets très minces, toujours accompagnés de matières réductrices, substances végétales, troncs d'arbres, charbons imprégnés (Mansfeld), véritables couches bitumineuses imprégnées de cuivre. On connaît des gisements de ce genre à Minorque, dans le Mansfeld, dans la région de Perm, dans la Sierra Névada, etc.

Ces gisements sont localisés à une certaine phase géologique ; mais ils ne se trouvent pas toujours au même niveau. Le cuivre s'est déposé à une période de conditions favorables, quand la destruction de la chaîne hercynienne était assez avancée pour fournir des minerais. Suivant les points, cela a pu avoir lieu, soit dans le Permien, soit dans le Trias.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE IV

PROBLÈMES GÉNÉRAUX

1 Associations minérales. — Les associations de minéraux que l'on trouve dans un même type de remplissage donnent des renseignements sur la nature du magma profond ; elles permettent d'orienter les recherches vers un minerai quand on a trouvé l'un de ses compagnons.

a) GROUPE DE L'ÉTAIN. — La gangue est quartzeuse avec du wolfram, de la pyrite, du mispickel. Les minéraux sont ceux qui accompagnent les granulites, c'est-à-dire des phosphates (apatite, montebrasite, wawellite, amblygonite, etc.), des fluorures (cryolite, tourmaline, émeraude). Les métaux associés sont : W, Bi, Mo, Cu et quelquefois Au [les gisements aurifères du Plateau Central sont presque toujours dans des régions stannifères]. Les gisements sont décelés à la surface par une substance verdâtre ou jaunâtre, due à une décomposition spéciale des feldspaths et donnant aux affleurements, comme à ceux des filons d'antimoine, un aspect caractéristique.

b) GROUPE SULFURÉ. — On trouve constamment associés les sulfures de zinc, fer, plomb, blende, pyrite, galène (par abréviation B. P. G.), ainsi que la chalcopyrite. Ces quatre sulfures font partie d'une même venue. On croyait autrefois que chaque métal était arrivé individuellement ; c'est là une erreur fâcheuse, qui a eu une répercussion sur la constitution des concessions : on a souvent donné séparément des concessions de zinc et de plomb, de même celles de fer et de cuivre, alors qu'il était impossible d'exploiter les métaux séparément ; il y a eu là une source de complications.

Ces minéraux et minerais se présentent dans les filons avec toutes les variations possibles ; un filon de galène peut se transformer en direction ou en profondeur en un filon de blende. Les règles qui président à ces modifications en direction nous échappent.

Ces associations qui caractérisent tel ou tel groupe de gisements se retrouvent même à l'état microscopique quand on considère un échantillon individuel. Ainsi, à l'examen spectrographique, une blende montre des

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

traces de toutes sortes de métaux (Pb, Cu, Hg, Sn, Sb, Mo, Bi) dont la nature et la proportion varient avec chaque gisement. Les blendes, provenant de gisements de profondeur (Scandinavie, Finlande, Canada; gîtes de la chaîne hercynienne en relation avec des masses granitiques), montrent des traces constantes d'étain (parfois en Stannine) et de molybdène, mais pas trace de mercure. Au contraire, les blendes des filons d'âge tertiaire (Algérie, Tunisie) présentent fréquemment des traces de mercure, mais jamais de traces d'étain.

L'examen spectroscopique permet donc de prévoir quels métaux pourront se trouver associés à celui qu'on exploite ; ils peuvent y être rares, mais il y a des cas où ils peuvent prendre de l'intérêt. Ainsi, il y a trente ans, le tungstène n'avait aucune valeur ; le wolfram était considéré comme une gène dans les gîtes d'étain et on le rejetait. Aujourd'hui le tungstène est recherché avec une grande activité.

2 Relations des filons et des roches ignées. — Suivant le type pétrographique des roches, on rencontre des métaux différents ; il semble donc que le type métallogénique puisse être en *relation avec la profondeur.*

Ainsi, l'*Etain* est associé aux *granites*, roches de grande profondeur ; l'*Antimoine* et le *Plomb*, aux *microgranulites*, roches de profondeur moyenne ; l'*Argent*, le *Mercure*, aux roches *microlithiques*, consolidées dans le voisinage de la surface.

Dans certains cas, les métaux forment des *auréoles autour des magmas granitiques* ; au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre, on trouve des types pétrographiques et des types métalliques plus superficiels. On peut rencontrer ainsi successivement l'étain, puis le cuivre, le zinc, enfin le plomb.

Cet ordre de succession n'est pas général ; mais on en a observé la confirmation dans les régions les plus diverses, en Cornouailles, en Toscane, au Yunnan, etc. Il doit être en relation avec ce fait que les fumerolles s'éloignent progressivement de la roche en changeant de nature et de température ; successivement les chlorures, puis les sulfures y disparaissent.

3 Provinces métallogéniques. — On constate que certaines régions différentes présentent un même type métallogénique très caractéristique. Le mineur, habitué à un district déterminé et transporté dans un district du même type, s'y reconnaîtra sans peine. Au contraire, si on le conduit dans une région de type différent, il sera complètement désorienté.

On peut citer comme appartenant au même type : le Massif Central de la France, les Vosges, la Bohême, la Saxe, la Meseta espagnola, l'Altaï, entre les gisements desquels il existe un air de famille.

On peut ainsi faire un essai de classement des régions du globe ; on constate alors que chacun des types se trouve en relation avec certaines zones de plissements et de dislocations.

Tous les gîtes des chaînes de plissement de l'époque carbonifère (*chaînes hercyniennes*) sont du même type. Ceux des *chaînes tertiaires* sont d'un type différent. Un troisième type est celui des régions où *les mouvements tertiaires ont disloqué la zone des plissements hercyniens.* Enfin, au Nord se trouvent les *plateformes primitives.*

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Ce type métallogénique régional a son contre-coup jusque dans les traces de métaux étrangers englobés par un minerai d'une région. Suivant les régions, ces traces diffèrent, en obéissant à une loi théorique.

Grâce à toutes ces données, on peut, dans une contrée sur laquelle on n'a que des notions géologiques sommaires, prévoir le type de minerais qu'on y rencontrera.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

DEUXIÈME PARTIE

LES SUBSTANCES MINÉRALES

CHAPITRE PREMIER

AZOTE

1. Usages de l'azote et de ses composés. — L'*azote* joue un grand rôle dans le monde organique ; par contre, il est rare dans le monde minéral. Les plantes fixent l'azote de l'air atmosphérique et les animaux constituent leurs tissus aux dépens de l'azote des végétaux.

L'azote lui-même est utilisé pour réaliser des réactions chimiques en milieu inerte. On emploie surtout ses composés, l'acide nitrique, l'ammoniaque, etc.

L'*acide nitrique* joue un grand rôle dans l'industrie ; sa consommation augmente rapidement (5.000 tonnes par an en France). Il sert : 1° Comme agent d'oxydation dans la fabrication des acides : sulfurique, arsénique, oxalique ; 2° Comme agent de nitrification dans la préparation de divers composés nitrés (cellulose, nitroglycérine, celluloïd, explosifs, etc.) ; 3° Comme agent de dérochage dans le travail des métaux (cuivre, bronze, etc.) ; 4° Comme agent de dissolution dans la production des nitrates métalliques.

L'azote entre aussi dans la composition de l'*ammoniaque* et de ses sels qui ont des applications nombreuses (fabrication de la soude à l'am-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

moniaque, procédé Solvay), des *cyanures* employés dans le traitement des minerais d'or, etc.

Les *nitrates* sont utilisés : 1° (salpêtre, nitrate de potasse) comme agent oxydant permettant la conflagration du carbone et du soufre dans la poudre ; 2° *en agriculture.*

2. Emploi agricole des nitrates. — L'emploi, sous une forme industrielle, de l'azote en agriculture est relativement récent ; toutefois, de tous temps, on a pensé à faire usage des engrais azotés d'origine animale (fumier).

On sait que l'azote est un élément *essentiellement superficiel* qui existe *dans l'air* (79 %). La proportion augmente quand on monte ; à 80 kilomètres il y a prédominance d'azote et d'hydrogène. Au voisinage de la terre, la proportion d'azote et d'oxygène dans l'air reste constante. Cette constance, malgré les phénomènes qui ont tendance à faire varier les quantités des deux gaz (oxydation, réduction, absorption d'azote par les plantes...), semble être le résultat d'un équilibre momentanément établi.

C'est donc l'atmosphère qui est la grande réserve d'azote : celui-ci n'est assimilable par les plantes qu'après *oxydation.* Les procédés d'oxydation qui semblent intervenir sont :

1° Les *effluves électriques* ; 2° l'*action de microorganismes* découverts par Winogradsky, que l'on appelle des *nitromonades.* C'est par l'action de ces organismes nitrifiants que l'on peut expliquer la production d'efflorescences de nitre dans les pays chauds (N.W. de l'Inde, Perse, Sud-Algérien, Egypte, etc.), ainsi que la formation de salpêtre quand on arrose des platras avec du fumier. Des expériences ont montré qu'en arrosant du noir animal, préalablement ensemencé d'organismes nitrifiants, avec une solution de sulfate d'ammoniaque, on peut obtenir des nitrates trop dilués. Mais, en maintenant la température aux environs de 15 à 20 degrés et avec des labourages, on obtient, par hectare et par an, jusqu'à 1.200 tonnes de nitrates assez concentrés.

Les nitrates, très solubles, passent dans les eaux [leur présence dans l'eau est même un indice de celle de matières organiques et, par suite, d'une contamination possible]. La Seine emporte ainsi à la mer 238 tonnes de nitrates par an ; le Nil, 301 tonnes.

A cette dépense journalière d'azote, l'air a suffi longtemps. Mais dans nos cultures intensives, les procédés naturels de fixation de l'azote seraient tout à fait insuffisants. C'est pourquoi on recourt aux engrais nitratés.

Actuellement les nitrates sont fournis par deux sources :

1° Fabrication de *nitrates artificiels* et de *cyanamide* par fixation de l'azote de l'air (environ 880.000 tonnes en 1929) ; c'est là une industrie récente qui se développe beaucoup ; 2° *Nitrates du Chili* (environ 2 millions de tonnes par an). Découverts en 1821, ils ont commencé à être exportés vers 1827 ; ils ont subi des variations de prix considérables, d'abord 65 francs les 100 kilogrammes, puis 37 francs en 1879, 25 francs en 1888, 19 francs en 1890. Les prix, sujets à de grandes fluctuations pour causes diverses, oscillaient avant la guerre entre 17 et 22 francs. En mars 1932, le prix est de 20 francs-or les 100 kilos.

La production annuelle des nitrates du Chili, qui était de 150.000 tonnes entre 1830 et 1860, est montée rapidement après cette date : 1.500.000 tonnes

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en 1903, 2.100.000 tonnes en 1909, 2.400.000 tonnes en 1911, plus de 3.000.000 de tonnes en 1917. Puis elle est tombée par paliers à 1.000.000 de tonnes en 1922 par suite de la concurrence des industries électriques de fixation de l'azote. De 1923 à 1929, elle est remontée de 2.000.000 à plus de 3.300.000 tonnes ; mais les gisements de nitrates riches, presque seuls à être exploités jusqu'à présent, sont près de s'épuiser ; il reste, il est vrai, d'énormes gisements de nitrates pauvres.

3. Gisements du Chili. — Il y a, entre la Cordillère des Andes et la Cordillère Côtière, le long de l'Océan Pacifique, une zone assez étendue et relativement déprimée, occupée au Sud par des pampas et, dans le Nord, par une région désertique à efflorescences salines, le Désert d'Atacama et la Pampa de Tamarugal. C'est un pays extrêmement plat de 1.000 à 1.500 mètres d'altitude où l'eau et la végétation manquent complètement. C'est là que se trouvent les nitrates. On a rencontré de grandes difficultés dans la mise en exploitation du pays ; mais, maintenant, le chemin de fer d'Antofagasta à La Paz facilite l'accès. Les ports d'exportation sont : Antofagasta et Iquique.

Les efflorescences salines de la surface ont amené la découverte d'une série de bassins d'évaporation, appelés *salares* ou *nitrières*, dans lesquels les matières salines forment des croûtes durcies. A partir de la surface on trouve :

a) Couche de sable avec gypse (*chuca*) ;

b) Conglomérat de graviers à peine roulés (*costra*) avec ciment de sulfates divers et de chlorure de sodium. On y rencontre, vers la base, des efflorescences nitrées, donnant un aspect de terre gelée, ou *congelo* ;

c) Couche de nitrate, n'arrivant qu'exceptionnellement à la surface (*caliche*). L'épaisseur des couches, recouvrant la caliche, varie entre 1 mètre et 3 mètres. D'un gris sale, plus ou moins blanchâtre et jaunâtre, dure, la caliche contient jusqu'à 50 % de nitrate de soude, plus souvent 10 à 15 %, mélangés avec du chlorure de sodium, du sulfate de potassium, du sulfate de calcium, des sels de magnésium, du nitrate de potassium, des iodates, borates, etc. (Epaisseur : 0 m. 20 à 2 mètres) ;

d) Mince couche d'argile (*coba*) ;

e) Roche primitive.

Pour exploiter le gisement, on fait des sondages ; puis on fait sauter à la poudre ; on met ainsi à nu la *Caliche* qui est exploitable dès qu'on y rencontre 10 à 12 % de nitrate. On l'extrait, on la concasse et on la traite par dissolution. On sépare les différents sels par des cristallisations répétées. L'iode est le principal des sous-produits. Le produit marchand est un nitrate à 95 %, renfermant encore 2 % de NaCl.

Plusieurs hypothèses ont été faites sur *l'origine de ces nitrates.*

1° On a pensé que les gisements représentaient d'*anciennes plages marines* soulevées à plus de 1.000 mètres ; on s'appuyait sur la présence de l'iode et sur l'absence du phosphore. Mais cette hypothèse n'est pas conforme aux études géologiques faites sur les 75 kilomètres qui séparent les gisements de la côte.

2° On a supposé qu'il y avait analogie avec le gisement des Iles Chincha, dû à l'accumulation de *guanos d'oiseaux de mer* qui d'ailleurs contiennent

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

une faible proportion d'iode. Cette explication n'est guère applicable à une zone aussi vaste où l'on n'a d'ailleurs aucun indice d'énormes rassemblements d'oiseaux.

3° L'origine des nitrates peut être due simplement à une *végétation terrestre.* Si la pampa du Sud, riche et bien cultivée, se trouvait transformée en région désertique par suite d'un changement de climat, l'azote accumulé dans les végétaux pourrait peut-être se transformer en nitrates par l'action des nitromonades. Le sodium nécessaire viendrait alors du lessivage des roches volcaniques, les eaux accumulant tous ces produits dans les dépressions fermées, comme cela arrive dans tous les déserts. Le conglomérat de graviers de la partie supérieure serait alors l'apport des galets après la transformation.

Les principales mines sont : Cachiyugal, Rio Loa, Lautaro, etc.

4. Autres gisements de nitrates. — On connaît des formations de nitrates dans les régions désertiques de l'*Inde,* dans la *Californie* où nous trouverons aussi des gisements de borates, dans l'*Asie Mineure.* Mais, nulle part, ces gisements ne sont comparables à ceux du Chili.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE II

FAMILLE DU FLUOR, CHLORE, BROME, IODE

Les métalloïdes de cette famille ont joué un rôle très important comme *minéralisateurs* dans la formation des gîtes métallifères (étain). Les fumerolles les plus chaudes sont constituées surtout par des fluorures et des chlorures. Il en est quelquefois resté des traces dans les minéraux, mais leur proportion reste infime : les fluorures, chlorures, etc., très solubles, ayant été enlevés par les eaux [sauf la fluorine très peu soluble]. Les chlorures, bromures, iodures ont passé peu à peu dans les eaux des rivières, puis de la mer ; les actions géologiques ont eu pour effet d'augmenter la teneur des eaux marines en chlore. La contre-partie, l'évaporation et la concentration dans les salines, paraît ne jouer qu'un rôle secondaire.

Tous les corps, groupés dans cette famille, présentent de grandes analogies les uns avec les autres.

A. — FLUOR

1. Usages. — Le *Fluor* libre n'est connu que depuis 1886, grâce aux travaux de Moissan qui réussit à l'obtenir par l'électrolyse du fluorure de potassium, mélangé à de l'acide fluorhydrique anhydre. En 1900 seulement, on commença à le fabriquer industriellement ; mais ses applications sont encore rares à cause de son prix élevé (propriétés oxydantes, préparation de l'ozone).

Parmi ses composés, l'*acide fluorhydrique* sert à la gravure sur verre, comme antiseptique dans certaines fermentations, à la fabrication de l'acide hydrofluosilicique et des fluosilicates, dans certains travaux de forage.

Le principal minerai est la *fluorine* ($CaFl_2$) qui a elle-même des applications dans la métallurgie du fer et de l'acier ; elle donne une grande fluidité au bain et procure ainsi une économie considérable de combustible. Son usage, abandonné un moment à cause de l'insufflation de l'air, tend à être repris ; il faut seulement qu'elle ne contienne pas plus de 3 à 4 % de SiO_2. Elle est utilisée aussi dans la métallurgie de l'aluminium (il faut qu'elle ne contienne pas de SiO_2, qui passe dans l'aluminium et le rend cassant, et qu'elle soit très blanche). Elle sert dans la métallurgie du cuivre, dans

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

la fabrication de l'acide fluorhydrique. On l'emploie comme liant dans les manufactures de meules d'émeri. Les verreries en consomment également une certaine quantité (10 % de la consommation totale). Enfin quand elle est en blocs assez volumineux, elle sert de matière d'ornement. Les Romains fabriquaient ainsi les vases murrhins très renommés. L'inconvénient est une grande fragilité due aux clivages.

Un autre minerai fluoré, la *cryolite* ($6NaFl + Al^2Fl^6$), que l'on peut fabriquer industriellement en partant de la fluorine, est utilisé également dans la métallurgie de l'aluminium par électrolyse [il faut pour cela le débarrasser de la sidérose qui l'accompagne], dans la fabrication de savons spéciaux à base de soude.

2. Statistique. — La production mondiale de la *fluorine* est passée de 250.000 tonnes environ en 1924 à 380.000 tonnes en 1929. Les principaux producteurs sont : Les *Etats-Unis* (130.000 tonnes en 1929 ; 100.000 en 1927), l'*Allemagne* (107.000 tonnes en 1929 ; 44.000 en 1924), la *France* (55.000 tonnes en 1929 ; 23.000 en 1924 [la moitié de cette production française vient de l'Esterel], la *Grande-Bretagne* (42.000 tonnes en 1929 ; 50.000 en 1924).

Le prix moyen est, en 1931, de 115 francs-papier la tonne pour le sable lavé à 80-85 %, destiné à la métallurgie, 140 francs la tonne pour qualité triée et lavée à 92 %, de plusieurs milliers de francs pour les matériaux susceptibles de servir à l'ornementation.

Quant à la *cryolite*, elle n'est guère fournie que par le gisement du *Groenland* dont la production dépasse actuellement 30.000 tonnes (6.400 tonnes en 1919, 31.600 tonnes en 1925, 19.200 tonnes en 1927, 35.760 tonnes en 1930).

3. Gisements. — De nombreux minéraux contiennent du fluor en quantité plus ou moins importante. L'*apatite* est un fluo-phosphate (quelquefois un chloro-phosphate) contenant 5 à 7 % de fluor ; elle joue d'ailleurs un rôle dans la fixation du fluor : Carnot a montré que les os contenus dans le sol se chargeaient peu à peu en fluor et en a même tiré un procédé de mesure approximative du temps pendant lequel des os ont été enfouis d'après la teneur en fluor. *L'amblygonite*, la *wagnérite* contiennent jusqu'à 8 et 10 % de fluor. On en trouve également 1 à 5 % dans certains micas (*lépidolithe*, *phlogopite*), dans la *topaze*, l'*émeraude*,la *tourmaline*. Le fait est intéressant, car la synthèse de ces minéraux a été obtenue par l'action des fluorures et n'a pu être obtenue que par leur action.

Le fluor est exploité sous deux formes : la *fluorine* et la *cryolite*.

a) Fluorine. — Elle est très répandue ; on l'a considérée autrefois comme due uniquement aux venues fumerolliennes ; mais elle est susceptible de subir des remaniements secondaires (Derbyshire). Elle peut se trouver en association avec :

1) *Le groupe de l'étain.* — Avec l'apatite, la wavellite, la topaze, la tourmaline, comme en Tasmanie.

2) *La pyrite.* — Le cas est asssez fréquent : les filons, généralement oxydés en surface, contiennent, dans leur partie haute, de la fluorine et du manganèse.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

3) *Le plomb.* — C'est dans cette association qu'on exploite le plus souvent la fluorine. Dans beaucoup de filons, on rencontre à la fois de la galène, du quartz, de la barytine et de la fluorine. Comme celle-ci n'est pas concessible, on l'exploite dans certains filons concédés pour le plomb et où la galène est relativement peu développée.

4) *L'or et l'argent.* — La fluorine accompagne les tellurures d'or, dans les auréoles de contact de roches sodiques : syénites néphéliniques (Cripple Creek). En outre, la fluorine se trouve en petites veinules où elle est associée avec la barytine et le quartz, sans intérêt industriel d'ailleurs (Massif Central, Vosges, Bohême).

Nous citerons quelques types de gisements :

Dans la Haute-Loire, aux environs de *Brioude,* la fluorine forme des filons ayant jusqu'à 2, 3, 4 mètres de large. Elle a une belle coloration verte et s'accompagne de barytine.

Dans les Pyrénées, on a exploité à *Roumiga* une fluorine bien blanche qui a été utilisée dans la métallurgie de l'aluminium.

En Angleterre, on connaît, dans la Chaîne Pennine, une grande quantité de gisements métallifères, d'âge hercynien, traversant des calcaires carbonifères. En particulier, dans le *Derbyshire,* les gisements plombifères, intercalés dans ces calcaires, affectent des formes très spéciales : ils incrustent des fractures et des fissures horizontales et verticales (types en escaliers, en tuyaux). La Blue-John-Mine, où abonde la fluorine, montre des formes de remaniements fort curieuses d'âge très récent. La fluorine a été dissoute et se présente, soit en couches horizontales avec de la barytine, soit en stalactites pendant à la voûte de grottes dans les calcaires dinantiens, soit en veinules dans ces calcaires. Elle est souvent en masses assez volumineuses pour avoir permis la fabrication d'objets d'ornement de grande taille.

b) Cryolite. — La cryolite est un minéral blanc et lourd.

Il en existe de très rares gisements, ayant un intérêt théorique, à Miask dans l'Oural, dans le Colorado, etc.

Il n'y en a qu'un seul qui ait un intérêt industriel, celui d'*Evigtok* dans le *Groenland.* Le gouvernement danois arme tous les ans une expédition pour aller l'exploiter pendant la belle saison. Ce gisement est situé dans un massif de granite, au milieu duquel se trouve un filon de pegmatite : la cryolite se présente comme un accident minéralogique de cette pegmatite ; elle y est associée à de la cassitérite (peu développée et inexploitable), du wolfram, du bismuth, de la pyrite, de la sidérose et de la fluorine ; le gisement a donc tous les caractères des gisements stannifères. On y trouve, en outre, toute une série de minéraux rares tels que la columbite et la molybdénite.

B. — CHLORE

1. Usages. — Le chlore joue un grand rôle dans l'industrie, à l'état de *chlore,* d'*acide chlorhydrique,* de *chlorites,* de *chlorures de sodium* et *de potassium.*

Le *chlore,* obtenu à l'état gazeux ou liquide, sert à la fabrication des chlorites, des hypochlorites, au traitement de certains minerais d'or, à des réactions de chimie organique.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

L'*acide chlorhydrique* sert à la fabrication des chlorures, à l'extraction de la gélatine des os.

L'emploi des *chlorures décolorants* (hypochlorites) est dû à l'affinité du chlore pour l'hydrogène qui en fait un oxydant énergique en présence des substances organiques.

En pratique tout le chlore utilisé dans l'industrie vient d'un seul minerai, le *chlorure de sodium*, dont nous reparlerons à l'occasion du sodium.

2. Gisements. — Le chlore se trouve en petite quantité dans les roches ; toutefois les *traces* de chlore dans les minerais sont plus fréquentes qu'on ne le croit au premier abord. Les inclusions liquides renferment fréquemment certains cristaux de chlorure de sodium. On a émis l'hypothèse que le chlore des émanations volcaniques était le résultat du remaniement du chlore contenu dans les roches de profondeur ; mais il est possible également que ces fumerolles puisent directement leur chlore dans la même réserve profonde, à laquelle l'ont emprunté les roches.

Les chlorures de sodium, potassium et magnésium, qui sont aisément solubles, ont actuellement leur gisement le plus important *dans les eaux de la mer*. L'*évaporation* localisée de lagunes marines ou saumâtres dans des régions désertiques pendant les époques géologiques antérieures a donné des gisements de chlorures, encaissés dans divers étages et dont il sera question ultérieurement.

C. — BROME

1. Usages. — Le *Brome* a deux usages principaux : en photographie (AgBr), en thérapeutique (bromure de potassium, bromhydrate de quinine, etc.). Il joue aussi le rôle d'oxydant dans la fabrication du ferrocyanure de potassium et du permanganate. On en consomme un peu dans la fabrication de diverses matières colorantes, dans la métallurgie de l'or (cyanuration) et comme désinfectant.

2. Production. — La consommation du brome, autrefois assez insignifiante, tend à s'accroître beaucoup avec le développement de la photographie et des films cinématographiques. On l'a longtemps retiré uniquement des cendres de *varechs* et des *eaux mères de marais salants* ; les varechs ont la propriété de s'assimiler les bromures renfermés à l'état de traces dans les eaux et de concentrer le brome en quantité visible. Ce qui subsiste de cette industrie produit environ 20 tonnes en Ecosse et 5 à 6 tonnes en France.

Le brome vient maintenant : des *Etats-Unis* (390 tonnes en 1915, 980 tonnes en 1928, 3.800 tonnes en 1930), où on traite des eaux-mères de salines, de lagunes saumâtres d'évaporation ; des gisements potassiques de *Stassfurt* (1.800 tonnes en 1929, 3.500 tonnes en 1930) et d'*Alsace* (24 tonnes en 1926, 300 tonnes en 1929, 500 tonnes en 1930) et de la *Tunisie* où les Sebkas du Sud en fournissent un peu.

Le cours du brome a considérablement varié : de 70 francs le kilogramme en 1870, il est tombé peu après à 3 francs. Puis il est remonté entre

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

6 et 7 francs en 1900, pour redescendre entre 1 fr. 50 et 2 francs dans les années qui ont précédé la guerre. En mars 1932, le brome liquide est coté 24 fr. 50 (francs réduits) le kilogramme.

D. — IODE

1. Usages. — L'*Iode* a des usages analogues : en photographie, en thérapeutique, dans l'extraction de l'or, dans la fabrication de certains iodures (iodures d'éthyle, de méthyle, etc.) et de diverses matières colorantes.

2. Gisements. — Le brome et l'iode sont en beaucoup moins grande quantité dans les roches que le chlore et le fluor, ainsi que le montre leur faible proportion dans l'eau de mer. Leurs sels sont extrêmement solubles, souvent même déliquescents. Il est donc très difficile de les mettre en évidence. Il faut noter d'ailleurs que les chlorures, bromures, iodures, que l'on trouve souvent à la surface des gisements métallifères, sont dus à des transformations secondaires sous l'action des eaux de surface et ne sont aucunement en rapport avec les conditions originelles.

On continue à extraire l'iode des *cendres de varechs et d'algues marines* : à *Java* (60 à 75 tonnes), au *Japon* (50 à 60 tonnes), en *France* (40 à 60 tonnes), en *Ecosse* et *Irlande* (25 à 50 tonnes), en *Norvège* (5 tonnes), etc. Mais la plus grande partie de la production vient des *nitrates du Chili* (production nulle jusqu'en 1885 ; 600 tonnes en 1893 ; 350 tonnes en 1920 ; 600 tonnes en 1924 ; 1.100 tonnes en 1926 ; 800 tonnes en 1928). Enfin de nouvelles méthodes ont permis récemment d'extraire de faibles quantités d'iode des résidus du traitement des *huiles minérales de Californie et du Daghestan russe*. Le prix de l'iode est variable : 36 francs en 1890 ; 20 francs avant la guerre ; 210 francs le kilogramme (francs réduits) en mars 1932.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE III

FAMILLE DU SOUFRE, DU SÉLÉNIUM, DU TELLURE

A. — SOUFRE

1. Usages. — Le *Soufre* a de nombreux usages ; il sert sutout à la fabrication de l'acide sulfurique. L'importance de ce dernier produit est si grande qu'on a pu dire que le degré de civilisation industrielle d'un pays se mesurait à sa consommation d'acide sulfurique.

Le soufre est encore utilisé pour le soufrage des vignes, la fabrication de la poudre et des produits pyrotechniques, des allumettes, le blanchiment de la paille, de la laine, le scellement du fer dans la pierre, la fabrication du chlorure de soufre, du sulfure de carbone (vulcanisation du caoutchouc), de l'hydrogène sulfuré, etc.

Le prix du soufre était de 200 francs la tonne en 1890 ; il a baissé à 140 francs en 1895 ; il est remonté à 190 francs en 1900 et à 250 francs en 1909. En mars 1932, il est de 1.250 francs réduits (soit 250 francs-or).

L'*Hydrogène sulfuré* est surtout employé pour l'analyse chimique.

Le *Sulfure de carbone* se prépare en faisant passer de la vapeur de soufre sur du coke. Il sert à la vulcanisation du caoutchouc, à la fabrication d'huiles essentielles, de parfums, etc. On en consomme, rien qu'en France, 5.000 tonnes, valant 2.850 francs la tonne (mars 1932).

On produit par an 21 millions de tonnes d'*acide sulfurique* (7.700.000 tonnes aux Etats-Unis ; 2.300.000 tonnes en Allemagne ; 1.600.000 tonnes en France ; 1.500.000 tonnes en Grande-Bretagne ; autant au Canada ; 1.300.000 tonnes en Italie, etc). L'industrie des superphosphates absorbe 50 % de cette consommation ; celle du raffinage du pétrole 30 %.

Bien que l'on ait fabriqué de l'acide sulfurique depuis 1666 et que l'invention des chambres de plomb date de 1746, l'industrie du soufre fut longtemps très restreinte. Elle ne s'est développée qu'au XIX^e^ siècle. Pendant longtemps, les seuls gisements de *Soufre* exploités furent ceux de Sicile qui avaient ainsi un véritable monopole. Le soufre se vendait fort cher. Quand Leblanc découvrit son procédé de fabrication de la soude, le besoin de soufre devint très grand et les producteurs se coalisèrent en 1835 pour en tripler le prix du jour au lendemain. Deux ans après, Perret trouvait le moyen de fabriquer l'acide sulfurique en partant des pyrites.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Il faut à peu près une tonne de pyrite pour faire une tonne de SO^4H^2. Le procédé fut immédiatement appliqué en Scandinavie, en Vénétie, dans le Sud de l'Espagne, en France, aux Etats-Unis, etc., où les premiers grands gisements de pyrite furent découverts. Une crise s'ensuivit sur le soufre natif et, en particulier, dans l'industrie solfifère de Sicile. Puis un *modus vivendi* s'établit.

La Sicile gardait le monopole pour les industries autres que celle de l'acide sulfurique et pour celle-là même quand il fallait un acide exempt d'arsenic. En effet, la pyrite contient fréquemment un peu d'arsenic (sauf celle de Sain Bel). De plus la Sicile fournissait la plus grande partie du soufre nécessaire aux Etats-Unis, celui-ci arrivant par mer aux Etats industriels de l'Est plus économiquement que la pyrite venant des Etats miniers de l'Ouest.

Mais en 1903, la découverte des gisements de Louisiane et du Texas, qui alimentent désormais le marché industriel américain, a déterminé une nouvelle crise en Sicile avec accumulation en Sicile de gros stocks de soufre. A l'heure actuelle, l'industrie sicilienne s'est modernisée.

2. Statistique. — *a*) SOUFRE NATIF. — Les deux principaux producteurs de soufre natif sont : les *Etats-Unis* et l'*Italie*. En 1929, le Texas a fourni plus de 2.400.000 tonnes. La production italienne fut, la même année, de 320.000 tonnes : elle oscille dans l'ensemble autour de 300.000 tonnes (par exception 167.000 tonnes en 1922).

Les autres pays ne contribuent à la production totale que pour une faible partie : l'*Espagne* (75.000 tonnes de minerai brut en 1929), le *Japon* (65.000 tonnes en 1929), l'*Autriche* et la *Hongrie* (25.000 tonnes en 1925), le *Chili* (10.000 tonnes en 1921 : 16.000 tonnes en 1929), la *Grèce* (2.500 tonnes en 1927), la *France* (1.400 tonnes en 1926 ; 400 tonnes en 1927 ; 300 tonnes en 1928).

Au total, la production mondiale a été d'environ 2.200.000 tonnes en 1925 et de 2.960.000 tonnes en 1929.

b) PYRITES. — Il ne s'agit ici que des pyrites servant à l'industrie du soufre et de ses composés.

La production mondiale de ces pyrites, souvent cuivreuses, s'élève à plus de 7.500.000 tonnes (1929). La plus grande partie est fournie par la *Péninsule Ibérique* ; soit : *Espagne* : 600.000 tonnes (avec les pyrites cuivreuses utilisées indirectement pour leur soufre : 3.870.000 tonnes), *Portugal* : 380.000 tonnes.

La *Norvège* fournit environ 740.000 tonnes (300.000 tonnes en 1916).

L'*Italie* a une production d'environ 700.000 tonnes (550.000 en 1928).

Le *Japon* a une production croissante, qui a atteint, en 1928, 600.000 tonnes.

L'*Allemagne* a donné 350.000 tonnes en 1928 et en 1929 ; elle a produit beaucoup plus pendant les années de guerre (817.000 tonnes en 1918), ayant eu besoin de fabriquer beaucoup de SO^4H^2 pour la préparation de ses explosifs, alors que la production mondiale lui faisait défaut.

Les *Etats-Unis*, après avoir eu une production en baisse, regagnent peu à peu leur niveau d'avant-guerre (350.000 tonnes en 1913 ; 160.000 tonnes en 1921 ; 330.000 tonnes en 1929).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Chypre produit, depuis peu, près de 300.000 tonnes.

Le chiffre de la *France* oscille autour de 200.000 tonnes.

La *Grèce* et la *Russie* ont chacune une production d'une centaine de mille tonnes.

Le *Canada*, qui avait une production assez forte (près de 400.000 tonnes en 1918), ne fournit plus que 60.000 tonnes (1928) à 70.000 tonnes (1929).

3. Gisements de soufre. — Les gisements de soufre appartiennent à trois types :

I. — Les solfatares } Soufre natif.
II. — Les solfares }
III. — Les gisements de pyrite.

I Solfatares. — (Origine volcanique).

Les solfatares sont constituées par des efflorescences de soufre dans les régions volcaniques. Ces dépôts sont produits par décomposition de l'hydrogène sulfuré contenu dans les fumerolles. Le soufre imprègne les roches volcaniques au voisinage du point d'émission de ces fumerolles.

Ces gisements sont fort peu importants. On en rencontre en *Italie*, en *Islande*, au *Japon*, aux îles *Hawaï*, au *Chili*. Au *Mexique*, au fond du cratère du Popocatepelt, se forme une faible quantité de soufre, qu'on exploite d'une manière rudimentaire.

II Solfares. — (Origine sédimentaire).

Les solfares se trouvent surtout dans deux régions du globe :

1° La *Sicile* et une partie de l'Italie ;

2° La *Louisiane*, dont les gisements sont exploités depuis peu de temps. Ces deux gisements sont *d'âge tertiaire*.

On trouve en outre quelques gisements de ce type sans intérêt pratique dans le Permien de Russie.

α) Gisements de Sicile. — Ils s'échelonnent le long de la ligne de Catane à Girgenti ; ils ont été exploités depuis l'époque romaine jusqu'à nos jours par des procédés rudimentaires, en général par des descenderies dans la couche riche.

Le soufre se trouve dans des calcaires. L'ensemble de la formation appartient au Miocène supérieur (*Pontien*). La série sédimentaire est la suivante de haut en bas :

	5 Calcaire *marin* à Foraminifères (*trubi*).....		*Pliocène*
Episode lagunaire	4 Formation sulfo-gypseuse avec calcaire imprégné de *soufre*, argiles noires schisteuses (*tufi*) et grès fins micacés	*Pontien*	*Miocène*
Caractère lacustre dominant	3 Tripoli avec marnes siliceuses, lignites et Poissons		
	2 Argile bitumineuse		
Formations lagunaires	1 Marnes sableuses salifères avec amas de *sel gemme*, hydrocarbures (macalubes).	*Sarmatien*	

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

L'ensemble du pontien et du sarmatien a donc un caractère nettement lagunaire avec intercalations lacustres et traces nombreuses de vie organique.

Tous ces terrains ont été fortement bouleversés, plissés, disloqués, redressés. Les gisements de soufre sont en relation directe avec les dépôts de sulfate de calcium (gypse) ; ils consistent essentiellement en calcaires imprégnés de soufre, celui-ci disparaissant à la surface pour laisser place à un calcaire très corrodé, carié, appelé « briscale ». Ces gisements n'ont donc aucun rapport avec l'activité volcanique : ce sont des dépôts de gypse, réduits postérieurement à leur formation.

On rencontre le soufre sous forme de petits lits inclus dans le calcaire (minerai zoné). Ces lits sont plus ou moins rapprochés et la teneur moyenne donne lieu à trois catégories industrielles de produits :

1. Stérile : 0 à 8 % S.
2. Minerai de soufre : 8 à 40 % S. ; moyenne 24 %.
3. Soufre natif : plus de 40 % S.

La teneur moyenne de 24 % correspond exactement au rapport entre les équivalents du soufre et du carbonate de calcium. Elle correspond aussi au chiffre que donne le calcul des réactions chimiques en supposant que le sulfate de calcium ait donné du sulfure de calcium CaS, qui se serait ensuite transformé en polysulfure CaS^n, puis décomposé, par l'action de l'acide carbonique, en S et CO^3Ca. Toutefois, dans d'autres gisements du même type (Louisiane, Abruzzes), le pourcentage moyen du soufre est tout différent et souvent plus fort, peut-être par suite de déplacements et de concentrations dans le milieu sédimentaire.

Le soufre se présente parfois sous forme de soufre natif, bien cristallisé en géodes, accompagné de célestine : il s'agit probablement d'une recristallisation, bien postérieure au dépôt, du soufre disséminé dans la masse.

Il semble donc qu'il y ait eu, à l'époque sulfogypseuse, dépôt de gypse dans des lagunes saumâtres, comme dans le bassin de Paris, puis *réduction par des hydrocarbures* venus probablement des terrains sous-jacents. On a tenté d'attribuer l'origine de ces hydrocarbures à l'activité volcanique, qui se manifeste en effet en dernière phase par la venue de fumerolles hydrocarburées. On les a rattachés à l'éruption de volcans de boue (macalubes) de la région de Girgenti ; mais l'origine de ces macalubes encaissés dans les formations solfifères est elle-même problématique et, sans doute, en rapport avec des dépôts sédimentaires analogues à ceux d'où procède le pétrole.

Une autre caractéristique est la fréquence de la *strontiane* dans les gisements de soufre siciliens : célestine en rognons et, de plus, 3 à 4 % de strontiane disséminée dans les calcaires. La présence de sulfate de strontium, de baryum, etc., dans les masses gypseuses n'a, d'ailleurs, rien d'exceptionnel.

L'exploitation est souvent très rudimentaire. Cet état est dû principalement au grand morcellement des terrains, exploités par leurs propriétaires eux-mêmes (de là les petites galeries). De plus, les travaux anciens gênent considérablement les nouveaux et font échouer toutes les prévisions concernant la richesse des couches. Toutefois, quelques exploitations travaillent avec un équipement moderne.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

L'industrie soufrière de Sicile est actuellement en fort mauvaise position. La découverte des gisements de Louisiane lui a fermé à peu près complètement le débouché américain. De plus, les petits propriétaires traitent leur minerai au moment de la belle saison et jettent tout leur soufre en même temps sur le marché, d'où une baisse momentanée à leur détriment. Le gouvernement italien a tenté d'enrayer la crise en établissant le monopole de l'achat aux propriétaires et de la vente à l'intérieur. Cette mesure artificielle a eu l'effet habituel de tous les cartels et monopoles d'Etat en face d'une crise ayant une origine profonde qui tôt ou tard finit par prendre le dessus.

On avait extrait, jusque vers 1910, 20 millions de tonnes de soufre ; on estimait alors qu'on en avait perdu 7 à 8 millions dans les travaux et qu'il en restait encore 40 millions. Le gisement aurait donc contenu primitivement au total 70 millions de tonnes.

Il y a, en outre, une grande quantité de minerais pauvres.

En *Romagne*, en *Calabre*, dans les *Marches*, il existe des gisements analogues, au milieu de formations sulfogypseuses avec sel et hydrocarbures : la strontiane est remplacée ici par la baryte qui n'existe pas en Sicile ; ce fait tient à la nature des roches de soubassement.

β) Gisements de la Louisiane et du Texas. — Ils sont connus depuis 1870, mais ils n'ont pu être exploités qu'en 1903. Ils se trouvent près du Golfe du Mexique, non loin de la frontière du Texas, à 370 kilomètres de la Nouvelle-Orléans, qui est le port d'embarquement.

Leur âge est tertiaire, probablement miocène.

Le gisement est vers 150 mètres de profondeur dans des couches gypseuses recouvertes par 10 mètres de calcaires caverneux et 50 mètres de sables aquifères en communication avec l'Océan. Il est en association avec des hydrocarbures (Pétroles du Texas). L'exploitation par puits étant difficile à cause de l'énorme masse susjacente de sables aquifères, on emploie un procédé très original de sondage. On envoie dans un tube annulaire de la vapeur d'eau sous une pression de 7 atmosphères, se trouvant à la température de 168° ; le soufre, dont le point de fusion est de 136°, fond ; liquide, il monte dans l'enveloppe annulaire du tube de sondage et arrive à la surface où il coule dans des bassins et peut être mis en pains sans raffinage préalable. Ce procédé a présenté quelques difficultés de réalisation ; mais il a pu être appliqué ensuite sans encombres avec une dépense d'énergie assez considérable, fournie d'ailleurs à bon marché par le pétrole du Texas qui est à proximité.

L'exploitation, commencée d'abord en Louisiane, est aujourd'hui localisée au Texas (Texas Gulf Sulphur C°, etc.).

γ) En France, on connaît aussi quelques marnes solfifères employés pour le traitement de la vigne. (Les Tapets dans la Vaucluse, Camoins dans les Bouches-du-Rhône ; découverte récente à Malvesi près de Narbonne, dans l'Aude).

III **Gisements de pyrite.** — La pyrite présente sur le soufre un gros désavantage : il faut commencer par la griller. Elle est extrêmement banale à la surface du globe, tantôt presque pure, tantôt associée au cuivre, tantôt à l'or. Nous reparlerons plus tard des gisements de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

pyrite cuprifère et aurifère. Pour qu'elle soit économiquement exploitable, en tant que simple source de soufre, il faut qu'on la rencontre en amas volumineux ; ce n'est que dans de rares exceptions qu'on l'exploite en filons.

Les principaux gisements pyriteux sont :

En Espagne, dans la province d'*Huelva* (gisements de formes très variables, tantôt cuprifères, tantôt non cuprifères) ; en Allemagne, au *Rammelsberg* ; en France, à *Sain-Bel* ; dans l'*Oural* ; en *Hongrie* ; dans l'*Afrique du Sud* (très gros gisements de pyrite cuivreuse dans le Namaqualand et le Zoulouland) ; aux *Etats-Unis (Caroline, Dakota)* ; en Suède, à *Falun* ; en Norvège, à *Röraas* ; en Vénétie, à *Agordo*, etc. Je me bornerai ici à en citer quelques exemples, les autres devant être étudiés à propos du cuivre ou de l'or.

α) Filons de pyrite. — La pyrite de fer a cristallisé dans les terrains sédimentaires sous forme d'imprégnations diffuses et dans des filons proprement dits. Mais les résultats fructueux s'obtiennent seulement sur les grosses lentilles d'exploitation facile. L'existence de ces deux formes de gisements est caractérisée à la surface par l'existence d'un *chapeau de fer* très développé.

Filons pyriteux de France et d'Algérie. — Les filons pyriteux ne sont que des B. P. G. dans lesquels la pyrite domine. Ce sont presque tous des filons *tertiaires* remplissant des failles échelonnées au milieu de terrains secondaires et pénétrant latéralement sous forme de filons-couches, au contact des terrains calcaires.

On connaît en France beaucoup de ces gisements : dans le *Morvan* et surtout sur la *bordure Sud-Est du Massif Central*, entre Valence et Alès. Cette bordure, très faillée, constitue une zone métallisée fort intéressante. A *Saint-Julien de Valgalgues* près d'Alès, la pyrite a incrusté le plan de joint entre deux couches d'inégale compacité : le calcaire à entroques (au toit) et le Lias marneux (au mur). Ailleurs elle forme des couches dans l'Infralias.

En *Algérie*, des filons tout à fait semblables se rencontrent dans des calcaires secondaires de divers âges.

Filons de Toscane. Gavorrano. — On trouve en Toscane toute une série de massifs anciens entourés de failles et formant des horsts au milieu du Tertiaire. Les fractures ont subi une minéralisation de sulfures divers (blende, pyrite stibine, cinabre, etc.), exploités dès la plus haute antiquité. Les anciens exploitaient la galène et le cinabre ; mais ils ne se sont naturellement jamais occupés de la pyrite.

On peut citer comme principaux gîtes, *Boccheggiano*, grand filon-faille avec quartz et pyrite cuivreuse, zones d'oxydation et de cémentation bien caractérisées, et surtout *Gavorrano*, peu important au point de vue industriel, mais très intéressant au point de vue géologique.

Au milieu de l'Eocène, se rencontre là un affleurement de terrains plus anciens avec un pointement granitique ; celui-ci est accompagné de dépôts permiens au-delà desquels viennent l'Infralias, puis le Lias. Le filon pyriteux se trouve sur les deux flancs du massif granitique, au contact du granite avec le Permien. La pyrite semble émanée du granite, probablement d'âge tertiaire, et pénètre dans les terrains voisins. Elle est très

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

pure et se présente entièrement cristallisée en grands cubes enchevêtrés, ayant jusqu'à 4 centimètres de côté, qui donnent aux galeries un aspect tout particulier. C'est donc un gîte de départ filonien.

β) Amas pyriteux. Sain-Bel. — Ce type est le plus habituel. Le minerai doit être pur, sans arsenic, ni fluorine, ni carbonate de chaux. Ces

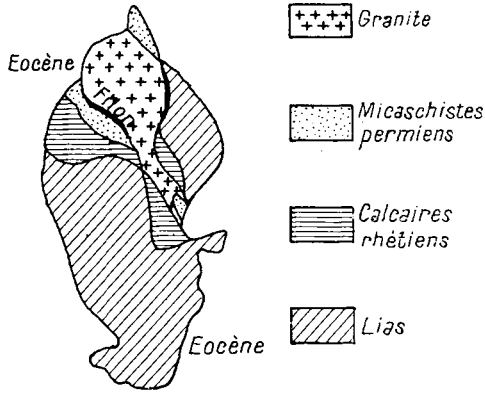


Fig. 29. — Carte du massif de Gavorrano.

conditions sont réalisées moins fréquemment qu'on ne pourrait le croire. Il n'existe en France qu'un beau gisement où elles se trouvent réunies ; c'est celui de *Sain-Bel* (Rhône) qui constitue l'amas-type.

Ce gisement est situé en bordure du Plateau Central, au N.-W. de Lyon. dans une bande de terrains cristallophylliens (schistes, chloritoschistes,

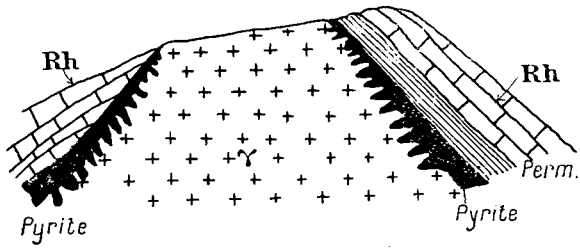


Fig. 30. — Coupe du massif de Gavorrano.

schistes à amphibole), s'appuyant à l'ouest sur le granité et recouverte par endroits par le Trias et le Jurassique. Le tout a été disloqué par les mouvements de l'époque tertiaire. La zone de *Sain-Bel* s'étend sur une assez grande longueur et offre des types très différents.

I. — En partant du Nord, on observe un premier type anciennement connu : celui de *Chessy*, exploité dès l'époque romaine et repris activement au xv^{e} siècle par Jacques Cœur ; les travaux, depuis longtemps abandonnés, se poursuivaient encore en 1833. Il s'agit d'un gisement de cuivre formant un amas A où la chessylite (carbonate bleu) se rencontre en géodes. La

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

pyrite était à l'origine cuprifère. L'exploitation est restée toujours dans la zone de cémentation (chalcopyrite).

Le long du contact des schistes pyroxéniques, on remarquait la présence d'une brèche. Puis, dans le Rhétien, en B, on a rencontré des rognons d'oxydes de cuivre noirs, constituant la « *Mine noire* ». En C, était la « *Mine grise* » ; en D, on a trouvé une veine verticale composée de cuprite mé-

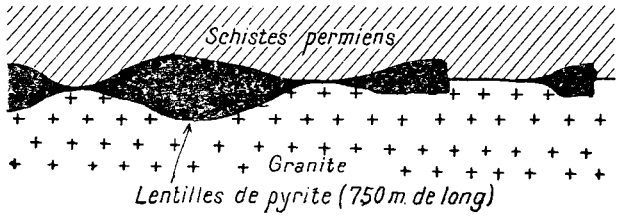


Fig. 31. — Plan théorique du gisement de Gavorrano.

langée à de l'argile rouge (d'où le nom de « *Mine rouge* »). Enfin, en E, on est tombé sur de la chessylite en veinules et géodes.

Il s'agit, en somme, de débris de gisements pyriteux, repris, remaniés et modifiés dans la région faillée, sans qu'il existe une notion précise sur l'âge de la venue métallifère originelle.

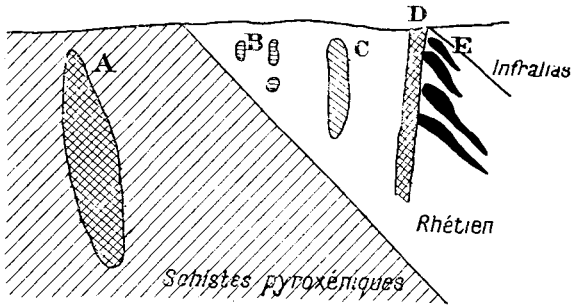


Fig. 32. — Coupe verticale du gîte de Chessy.

II. — Au Sud de Chessy, fait suite la zone pyriteuse proprement dite ou zone de Sain-Bel, où les lentilles pyriteuses se multiplient. Le plan ci-contre (fig. 33) indique l'allure du gisement. Vers le Nord, il existe d'abord une série de petits filons cuivreux inexploités ; on trouve ensuite la masse du Pigeonnier qui contient un peu de cuivre en profondeur, puis la lentille Saint-Gobain qui n'affleure pas en surface et dont on voit bien le coincement vers la partie supérieure. La lentille se ramifie à ses deux extrémités.

Ensuite vient le grand filon formé de pyrite très pure, à grain fin ; il est très réduit en surface ; on a constaté son prolongement en profondeur jusqu'à une assez grande distance de la surface, mais il est probable qu'il doit disparaître comme cela a été constaté pour la masse du Pigeonnier

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

(fig. 34). La plupart des exploitations actuelles portent sur le grand filon dont on a extrait jusqu'ici 6.000.000 de tonnes de pyrite.

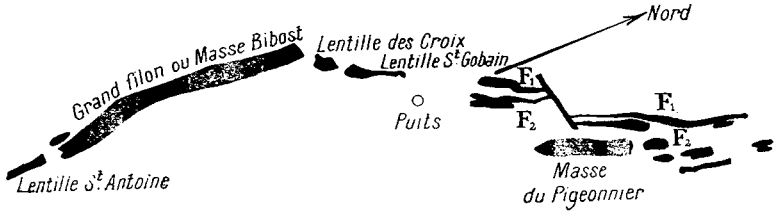


Fig. 33. — Plan du gisement de Sain-Bel.

Dans l'ensemble, aux deux extrémités du gisement, se rencontrent des lentilles très minces, presque des filons, remplies de pyrite impure avec un peu de blende.

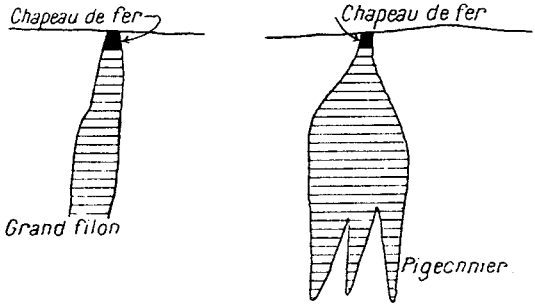


Fig. 34. — Coupes de deux amas de Sain-Bel.

Dimensions des principaux amas pyriteux. — Le tableau ci-dessous indique la dimension des principaux amas pyriteux européens par ordre d'importance.

	Longueur mètres	Largeur mètres	Section horizontale m²	Cubage tonnes	Cubage primitif présumé tonnes
				millions	millions
Rio-Tinto (Espagne) 1	1.000	150	65.000	200	400
Rio-Tinto (Espagne) 2	1.100	180	50.000		
Rio-Tinto (Espagne) 3	300	100	25.000		
Tharsis	1.000 à 250	120 à 20	100.000	30	70
San-Domingo (Portugal).	400	75	13.000	20	40
Sain-Bel (France)	1.300	44	16.500	20	40
Aguas Tenidas (Sud de l'Espagne)	150	50	7.500	3	—
Foldal (Norvège)	550	14	1.800	—	—
Röraas (Norvège)	350	3	—	2 à 3	—
Agordo (Vénétie)	250	80	—	0,9	—

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

B. — SÉLÉNIUM

1. Usages. — Le *Sélénium* a la propriété de varier, dans une proportion très forte, de résistance électrique sous l'influence de la lumière. On a utilisé cette curieuse propriété dans la plupart des procédés de télévision. De là naîtra peut-être une industrie intéressante. En outre, le sélénium est employé dans la coloration de certains verres alcalins.

2. Gisements. — Le sélénium est toujours *mélangé au soufre des pyrites*, mais la teneur en sélénium des pyrites est très faible. A *Sulitjelma* (Norvège), où cette teneur est relativement élevée, on l'estime à 1 contre 60.000 de soufre.

Les séléniures existent aussi *en association avec les minerais d'or* dont ils rendent le traitement très difficile (Sumatra) ; mais ils renseignent quelquefois sur la présence de l'or. A *Falun* (Suède), c'est un séléniure de bismuth et de plomb, blanc d'argent, affectant une forme en dendrites, qui permet aux mineurs de trier les fragments de pyrite contenant de l'or invisible.

C. — TELLURE

Le *Tellure* n'a guère d'applications qu'au laboratoire et il n'a pas actuellement d'importance pratique.

Comme le sélénium, on le trouve fréquemment *dans certaines pyrites et soufres natifs.*

On le rencontre également en *combinaison avec le bismuth, le plomb, le mercure et les métaux précieux.*

Les tellurures d'or en particulier (sylvanite) constituent de véritables minerais d'or : ils sont exploités dans deux des plus grands gisements aurifères du monde : à *Cripple-Creek* (Colorado) et en Australie occidentale (*Kalgoorlie, Coolgardie*), ainsi qu'en *Transylvanie.*

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE IV

CARBONE

Le *Carbone* est l'un des éléments minéralogiques essentiels ; il entre dans la constitution de beaucoup de substances utiles. Il existe, soit à l'état libre (graphite, diamant), soit à l'état combiné avec H et un peu d'Az (combustibles), avec O (CO^2, CO), avec Az (cyanogène), avec S (sulfure de carbone). Il se rencontre aussi dans le monde organique, la chlorophylle des plantes ayant la propriété de fixer le carbone de l'air en présence de la lumière solaire. Ce carbone organique peut d'ailleurs être le point de départ de la production d'hydrocarbures (cycle du carbone).

Dans le monde minéral, le carbone se trouve surtout à l'état de carbonates (dans les roches) et aussi à l'état de carbone libre et d'hydrocarbures.

Classification. — 1° *Carbone pur* : graphite, diamant. En réalité ces deux formes de carbone libre cristallisé, différentes par leurs propriétés (densité...), contiennent toujours des impuretés mélangées. Il est possible que ces impuretés aient joué un rôle dans la cristallisation du diamant.

Le carbone amorphe ayant pour densité 1,8, la densité du graphite est 2,25 et celle du diamant 3,51.

2° *Combustibles* : Tourbe, lignite, houille, anthracite, hydrocarbures, pétrole, gaz combustibles.

3° Composés formés par incorporation de *matières hydrocarburées* dans les terrains. C'est le cas des schistes bitumineux (incorporation dans des schistes) et de l'asphalte (incorporation dans un calcaire).

GRAPHITE

Le graphite, appelé aussi *mine de plomb* ou *plombagine*, a été longtemps confondu avec la molybdénite et la galène (d'où son nom de mine de plomb). C'est simplement du carbone, contenant une proportion plus ou moins grande d'impuretés ; la proportion du carbone est de 96 % en Sibérie, 90 % à Ceylan, 40 à 50 % en Moravie et en Bohême ; elle descend jusqu'à 20 % dans certains schistes graphiteux. On sait que le carbone libre, difficile à

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

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 hydrogène.

Le graphite se caractérise par l'action du mélange d'acide nitrique fumant et de chlorate de potassium. Ce mélange donne avec lui de l'oxyde graphitique jaune, tandis que le diamant n'est pas attaqué et que le carbone amorphe donne des produits gazeux ou solubles dans l'eau. L'oxyde graphitique, chauffé entre 200 et 300°, déflagre en formant une poudre noire, l'acide pyrographitique.

On distingue dans le graphite deux variétés principales, par cette action de l'acide nitrique fumant. Le *graphite foisonnant* qui, chauffé à 180° après traitement par NO^3H, augmente de 5 fois son volume primitif, se reproduit artificiellement en dissolvant du carbone dans des minerais fondus (platine, fonte). Il se retrouve dans la nature quand des conditions analogues paraissent s'être produites, comme à Kimberley. On le rencontre dans les granulites ou les terrains primitifs. Le *graphite non foisonnant*, qui, chauffé après traitement par NO^3H, n'augmente pas de volume, se touve dans les gisements de Sibérie, dans les roches pegmatoïdes de l'Ardèche, dans des granites de métamorphisme ; il s'obtient artificiellement par la volatilisation du carbone à l'arc électrique ; ce dernier type de graphite s'appelle aussi *graphititе*.

1. Usages. — Les usages du graphite sont dus à sa structure lamellaire et à sa nature réfractaire. Les lamelles minces de clivage se détachent et laissent une trace sur le papier (d'où l'usage pour les crayons) ; elles miroitent à la lumière d'un éclat métallique (d'où l'emploi comme matière colorante noire à l'éclat métallique pour les objets de fonte). Une certaine plasticité permet d'utiliser le graphite pour la fabrication des creusets, des tuyaux réfractaires servant à des fusions à haute température. On en enduit les moules de fonderie. Le graphite sert aussi comme lubréfiant, cambouis, etc. Les variétés très pures, grenues, sont taillées directement et servent à fabriquer des crayons ; mais, généralement, on utilise, à cet usage, des poussières de graphite qu'on agglomère ensuite. Les variétés de qualité inférieure s'emploient pour la fabrication des creusets réfractaires : dans ce cas, le graphite, auquel on incorpore 1 /3 d'argile, ne doit pas contenir d'impuretés fusibles (pas de chaux, ni de fer).

2. Statistique. — La valeur du graphite est très variable 5.000 à 6.000 francs réduits la tonne pour les bonnes qualités ; 3.000 francs à 4.000 francs pour les variétés courantes ; 1.200 à 2.000 francs pour les raffinades pour creusets ; 450 francs pour les raffinades ordinaires servant pour les moules de fonderie (prix d'avril 1932).

La production du graphite naturel peut être d'ailleurs concurrencée par le graphite artificiel, obtenu en chauffant de l'anthracite cendreux dans une chambre à l'arc électrique ; on obtient vers 2.000° du carborundum (si on a mélangé un peu de silice) ; puis, à plus de 2.000°, du graphite pur. Ce graphite sert aux usages électriques (électrodes) et fait concurrence aux variétés rares qui conservent leur valeur.

La production mondiale du graphite s'est élevée en 1928 à plus

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

de 150.000 tonnes (185.000 tonnes en 1916) ; elle se répartit ainsi :

Tchécoslovaquie (Bohême)	33.000 tonnes (40.000 en 1927)
Autriche	24.200 » (9.500 en 1924 ; 25.300 en 1929)
Corée	23.000 tonnes (24.600 en 1929)
Allemagne (Bavière)	17.500 » (41.000 en 1918)
Madagascar.....	14.000 » (26.000 en 1916 ; 16.000 en 1929)
Ceylan	14.500 tonnes (34.000 en 1916 ; 13.000 en 1929) (graphite pur)
Italie (Alpes)	7.000 tonnes (10.000 en 1925)
Mexique	5.200 tonnes (près de 6.000 en 1929)
Etats-Unis	5.000 tonnes (près de 6.000 en 1929)
Canada.....	1.000 tonnes (2.500 en 1926 ; 1.300 en 1929)
France	800 tonnes (1.100 en 1925 ; 800 en 1929)

3. Modes de gisement. — Nous distinguerons 3 types selon l'origine.

A. (I et II). — Origine minérale (graphite dans des roches éruptives).

B. (III). — Origine douteuse (surtout dans des roches métamorphiques).

C. (IV). — Origine organique et sédimentaire (graphite provenant de la transformation de combustibles).

I. GRAPHITE CRISTALLISÉ EN MILIEU BASIQUE. — *Roches diamantifères du Cap* avec graphite foisonnant. On s'est demandé si le graphite n'y était pas dû à la décomposition de carbures (carbures d'aluminium). *Graphites des météorites.*

II. GRAPHITE DANS DES ROCHES ACIDES. — Certaines *pegmatites* d'Amérique en contiennent jusqu'à 13 % ; ces cristaux de graphite foisonnant se sont consolidés avant le quartz et le feldspath qui se sont moulés sur eux. On peut en rapprocher les hydrocarbures liquides en inclusion dans le quartz (Norvège : ces hydrocarbures traversant des gisements d'oligiste l'ont souvent réduit en magnétite).

Le graphite se rencontre aussi dans certains *granites* : dans l'Ariège, il forme des nids dans un granite à tourmaline (graphite non foisonnant) ; on le trouve aussi en concrétions dans un granite pauvre en mica des monts Ilmen.

M. Lacroix a signalé la présence du graphite dans les quartz de *filons stannifères.*

On peut rattacher à cette catégorie de gisements le graphite de Sibérie et celui de Ceylan dont l'origine semble bien être profonde et inorganique.

Graphite de Sibérie. — Les gisements sibériens, un moment célèbres (graphite Alibert), sont actuellement abandonnés. Ils sont situés à l'Ouest du Lac Baïkal ; le graphite, en général non foisonnant, forme des nids et amas irréguliers dans une *syénite néphélinique,* traversant des couches de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

gneiss et des bancs de calcaires cristallins. Les schistes encaissants sont eux-mêmes parfois graphiteux ; cependant l'origine organique ne paraît pas admissible, car il s'agit d'un graphite absolument pur (97 % de carbone) qui se présente le plus souvent en très gros blocs. On a extrait de ces gisements de beaux échantillons d'un haut prix.

Graphite de Ceylan. — Les gisements de Ceylan ont une très grosse importance ; ils produisaient, il y a encore peu de temps, plus de 30.000 tonnes. Aujourd'hui leur production n'est plus guère que de 12.000 à 15.000 tonnes environ. L'île de Ceylan est formée d'un complexe de terrains cristallophylliens : gneiss très variés (granutilisés ; à biotite ; à amphibole et à pyroxène ; etc.), amphibolites avec bancs de leptynites grenatifères associées à des filons de quartz. Les gisements forment un véritable système de filons dans les leptynites et les veines de quartz asso-

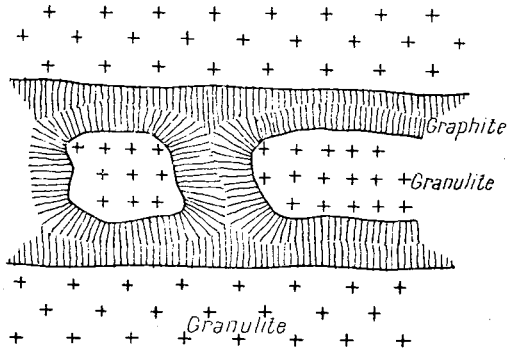


Fig. 35. — Echantillon de graphite de Ceylan.

ciées : dans ces filons très irréguliers, le graphite se trouve en poches ou en étroites veinules. La leptynite elle-même n'est pas graphiteuse. Le graphite affecte une structure radiée autour de noyaux de granulite éruptive et il a cristallisé perpendiculairement aux parois du filon (fig. 35). On a signalé, comme corps accessoires, du rutile, de l'augite, de la pyrite et de la calcite qui peut englober les concrétions rondes de graphite.

L'allure du gisement n'a là rien de sédimentaire.

III. GRAPHITE DANS DES GNEISS ET DES TERRAINS MÉTAMORPHIQUES. — On trouve en **Bohême** et en **Bavière** du graphite en veines dans des terrains métamorphiques, dans des conditions analogues à celles de Ceylán. On est là dans un massif hercynien, composé de gneiss, amphibolites, leptynites, cipolins. Le graphite comme à Ceylan, y forme des veines interstratifiées, sinueuses, non continues. La théorie sédimentaire est celle qui se présente d'abord à l'esprit ; mais on a soutenu aussi la théorie éruptive en s'appuyant sur l'existence de veines transversales (fig. 36).

Dans le district de *Passau*, les gneiss contiennent, au voisinage de massifs de gabbros (fig. 37), du graphite formant des lentilles, des paquets et

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

quelquefois des zones continues qui peuvent paraître interstratifiées ; mais on trouve aussi des poches de graphite (fig. 38) avec implantation de cristaux de graphite perpendiculaires à la paroi.

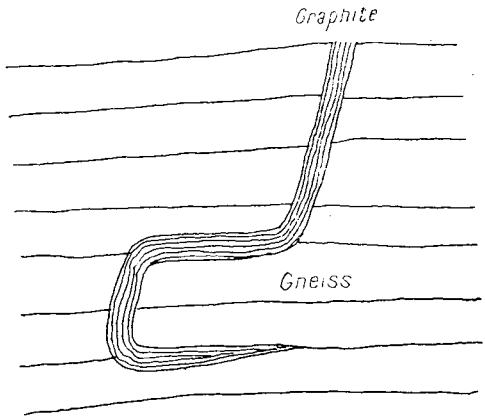


Fig. 36. — Bloc de gneiss avec veine de graphite (Passau).

Au Canada et aux **Etats-Unis,** des gisements semblables, d'origine douteuse, existent dans des gneiss.

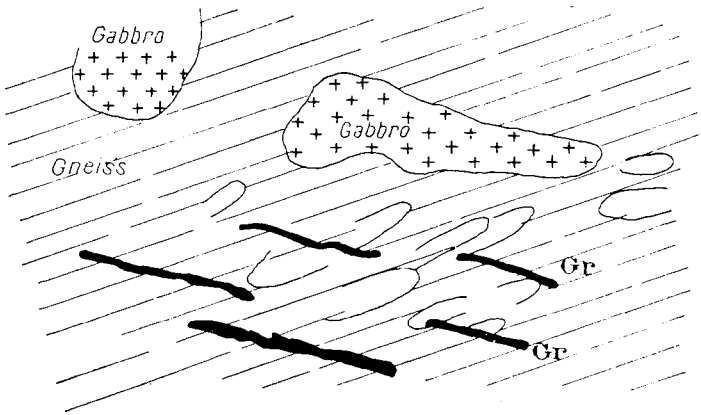


Fig. 37. — Carte montrant l'allure des gisements graphiteux dans le district de Passau.

IV — GRAPHITE D'ORIGINE SÉDIMENTAIRE. — Dans les Alpes (**Styrie, Italie**), l'origine sédimentaire du graphite n'est pas contestable, Le graphite se trouve (fig. 39) intimement *associé à des schistes*, au voisinage de leur contact avec des calcaires ; il est accompagné de talc, dont la présence a été invoquée pour soutenir l'origine éruptive du graphite, mais qui peut fort bien aussi être dû à des phénomènes de remaniement. Dans certains cas, il a conservé la structure de l'anthracite originelle.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les gisements de graphite industriel manquent en **France** ; il existe du graphite en plusieurs points de la *Bretagne* (dans le Morbihan), du *Massif*

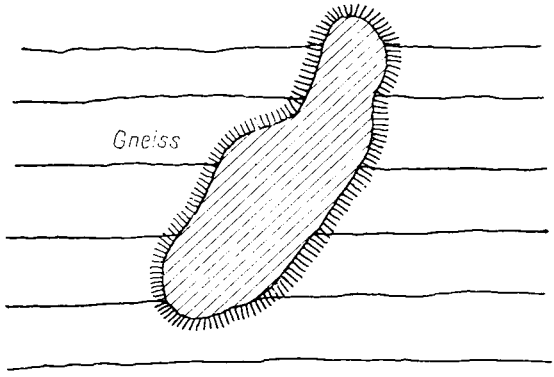


Fig. 38. — Poche de graphite dans le gneiss (Passau).

Central (Corrèze, Creuse, Haute-Vienne), dans les *Alpes* ; mais en trop petites quantités. Cependant des tentatives d'exploitations ont été

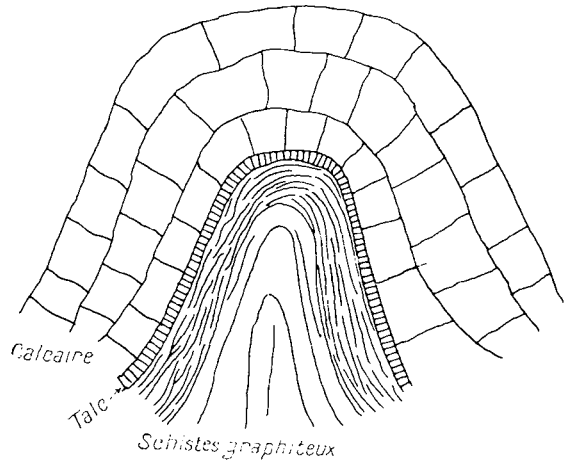


Fig. 39. — Coupe schématique d'un gisement graphiteux dans les Alpes,

faites à diverses reprises dans les Alpes. Au *Chardonnet* dans les Hautes-Alpes, le graphite se présente en veines interstratifiées. *Madagascar* exploite aujourd'hui du graphite assez activement.

DIAMANT

1. Nature. — C'est du carbone libre cristallisé. L'analyse précise fut faite par Dumas en 1840. Le diamant n'est jamais pur, même dans les types les plus transparents; il tient au moins 0,1 à 0,2 % de cendres,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

dans lesquelles entrent le silicium, le fer, et le calcium. L'état réel de ces impuretés dans le diamant est inconnu (solution solide, interposition mécanique ?). Il est possible que ces éléments, surtout le silicium, aient joué un rôle actif dans la cristallisation du diamant.

2. Propriétés. — Le diamant existe sous trois états : a) *diamant proprement dit* (utilisé en bijouterie); b) *boort* (concrétionné, translucide, sans clivages); c) *carbonado* ou *diamant noir.*

Le diamant proprement dit se présente en *cristaux très petits* (ceux d'un gramme sont assez rares), presque toujours *à faces et à arêtes courbes* (phénomène superficiel, puisque les faces de clivage sont planes). Ses formes semblent dériver du cube; mais Mallard a montré qu'il s'agit du groupement de molécules probablement rhomboédriques. La *taille* est basée sur l'utilisation du clivage ; elle est rendue très délicate par l'existence du fil de la pierre : particularité longtemps tenue secrète par les tailleries d'Amsterdam ; elle se fait surtout à Amsterdam, Anvers, Paris, en Angleterre et au Cap ; elle donne naissance à une industrie très importante. On a d'abord taillé le diamant en tables, puis en roses ; actuellement la forme courante est le brillant à 32 faces.

La *dureté* dépasse celle de tous les minéraux connus. Le diamant ne peut être poli que par lui-même (poudre de diamant ou égrisée).

Ses propriétés optiques sont très caractéristiques. Il est généralement blanc avec des reflets bleutés ; cependant il peut avoir toutes les colorations. Quand il a une teinte pâle jaunâtre ou grise, il perd beaucoup de sa valeur. Au contraire, les colorations vives sont très recherchées (rouge, vert, bleu, jaune). On n'a pas réussi à décolorer le diamant.

Le diamant a un *indice de réfraction très élevé*, supérieur à celui de tous les corps transparents connus. Il présente donc à un degré supérieur le phénomène de la réflexion totale. Son coefficient de *dispersion* est également considérable (feux). Il *s'imbibe* de la lumière qu'il reçoit ; placé ensuite dans l'obscurité, il continue à donner un peu de lumière. Certains diamants sont phosphorescents ou fluorescents.

Il est complètement *transparent aux rayons X* ; cette propriété permet de reconnaître un diamant faux d'un vrai.

Enfin, il contient fréquemment des *inclusions*, ou crapauds, solides (graphite, quartz, topaze, rutile, pyrite, sulfate de fer, or). Les taches noires, qu'on prend souvent pour des inclusions ne sont que des creux remplis de gaz ; mais on n'a jamais constaté d'inclusions liquides.

3. Usages. — Le principal est la *bijouterie.* On emploie aussi le diamant dans les sondages et la perforation mécanique, grâce à sa dureté.

4. Prix et statistique. — La valeur du diamant, très élevée, varie beaucoup avec la couleur, la forme, l'éclat de la pierre ; elle varie aussi avec le temps, avec la mode. Elle croît à peu près proportionnellement au carré du nombre qui exprime le poids en carats (le carat-métrique = 1/5 de gramme). Les petits diamants de moins de 1/4 carat, d'origine alluvionnaire, ont peu de valeur.

Le carat taillé de 200 milligrammes valait en 1830, 250 francs environ ;

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en 1860, 300 francs ; en 1869, 700 à 800 francs ; en 1870, après la découverte des gîtes du Cap, 400 à 500 francs ; avant la guerre, 1.000 francs.

Les centres de production ont beaucoup varié d'importance. Tous les anciens diamants sont d'abord venus de l'*Inde* qui peut en avoir fourni 2.000 kilogrammes, mais dont les gisements se sont appauvris très vite et ne produisent plus rien.

Puis les diamants sont venus du *Brésil*, dans la période qui va de 1725 à 1870. Ces gisements ont été découverts en 1723. On estime qu'il est sorti, au total du Brésil 2.500 kilogrammes de pierres, d'une valeur de 500.000.000 francs-or.

A partir de 1870, le grand centre de production fut l'*Afrique du sud*. En 1876 on a découvert au Cap les premiers diamants d'alluvions ; puis, en 1870, la première « mine sèche » où le diamant est en place dans la roche jusqu'à de grandes profondeurs. Jusqu'ici l'Afrique du Sud a produit 30 à 34.000 kilogrammes de pierres.

En temps normal, la production annuelle est variable dans d'assez faibles limites. C'est qu'en effet elle est réglée selon les besoins du commerce. Le syndicat des négociants établit les chiffres de consommation et achète d'avance la production : les mines du Cap limitent leur extraction à ces chiffres. D'ailleurs le Parlement sud-africain protège étroitement l'industrie diamantifère et a permis la limitation de la production des diamants alluvionnaires susceptibles d'apporter des troubles momentanés sur le marché. En période de crise, cette marchandise de luxe est une des premières touchées et, en 1932, la plupart des mines ont dû être arrêtées, la production diamantifère ayant dû être stockée pendant deux ans pour ne pas laisser s'effondrer les prix, que l'on doit considérer dès lors comme tout à fait artificiels.

Voici comment se répartit la production mondiale qui s'élevait au total à plus de 7.300.000 carats en 1929 ; 7.700.000 carats en 1928 ; 4.200.000 carats en 1925 ; 1.300.000 carats en 1922 ; 5.330.000 carats en 1912 :

Union sud-africaine	3.600.000	carats	en 1929
	4.400.000	»	en 1928
Congo	2.200.000	»	en 1930
	1.900.000	»	en 1929
	900.000	»	en 1925
Côte de l'Or	660.000	»	en 1929
	700.000	»	en 1928
	80.000	»	en 1925
Sud-Ouest Africain	550.000	»	en 1929
	700.000	»	en 1927

Puis viennent de petites productions ; par exemple :

Angola	300.000	carats	en 1929
	100.000	»	en 1923
Guyane anglaise	120.000	»	en 1929
	200.000	»	en 1928
	100.000	»	en 1921
Brésil	50.000	»	en 1929
	15.000	»	en 1924

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Tanganyka.....	25.000	»	en 1929
	400	»	en 1925
Inde	1.600	»	en 1929
	50	»	en 1925
Bornéo	700	»	en 1928
	2.000	»	en 1922

5. Gisements du Cap. — Comme les gisements du Brésil et de l'Inde, les gisements du Cap ont été trouvés dans des alluvions qui furent tout d'abord seules exploitées et qui, à l'heure actuelle, ont perdu beaucoup de leur importance, sauf le long du fleuve Orange et dans l'ancien Ouest-Africain allemand. Quand on découvrit la première mine sèche (*Dutoit's Pan*, 1870), on n'en reconnut pas la véritable valeur : on crut à une origine glaciaire, puis à des alluvions venues par siphon dans la cheminée diamantifère cylindrique. Ce n'est que plus tard qu'on en comprit la nature éruptive.

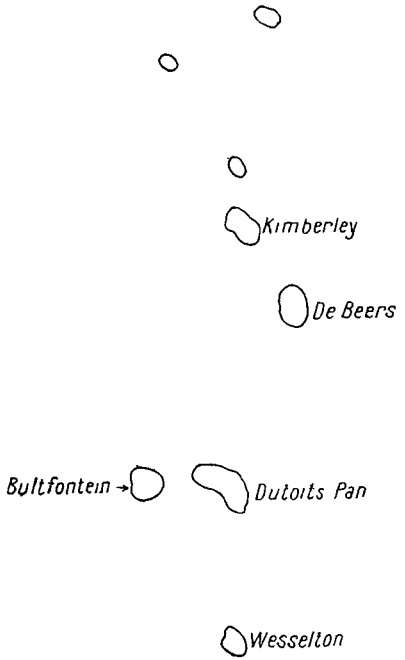


Fig. 40. — Plan des cheminées diamantifères de Kimberley.

On exploita les premières mines, *Bultfontein*, *De Beers*, *Kimberley*, comme si on avait affaire à des alluvions. Il y eut un véritable rush ; on partagea le sol en petits carrés de 10 mètres de côté (claims), appartenant aux premiers occupants et où ceux-ci devaient travailler seuls et sans aide.

Ce système entraîna des difficultés quand la persistance des prétendues alluvions amena un approfondissement graduel : on fut tout à fait embarrassé pour l'évacuation des débris.

En 1872, pour établir des voies de circulation, on fut conduit à exproprier les claims de rang pair ; puis en 1874, l'évacuation des débris se fit par câbles va-et-vient.

Vers 1882, une succession d'écroulements arrêta les exploitations : les exploitants comprirent la nécessité d'installations modernes avec puits et galeries et fusionnèrent en petites sociétés qui se concentrèrent peu à peu dans la Compagnie de Beers. Celle-ci acquit le 5e gisement, celui de *Wesselton*, trouvé en 1890, s'assura le contrôle de la *Jagersfontein* et exerça un véritable monopole. Plus tard fut découverte la mine de *Premier*, près de Prétoria.

Conditions de gisement. — Les terrains de la région reposent sur un socle de terrains plissés, formant une plateforme primitive sur laquelle se sont déposées les couches horizontales du *Karoo*, d'origine lacustre (depuis

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

le Carbonifère supérieur jusqu'au Lias). C'est dans la série plissée qu'on rencontre les mines d'or du Transvaal ; quant au Karoo, épais parfois de 2.000 mètres, il renferme des grès, des schistes, des intercalations éruptives et des couches de houille et il est arrivé que, dans la même concession, on ait extrait l'or en profondeur et le charbon au-dessus.

Ces diverses couches, plissées et horizontales, sont traversées, comme à l'emporte-pièce, par des *cheminées diamantifères* qui jalonnent sans doute une cassure sur une longueur d'une dizaine de kilomètres (fig. 40). Ces cheminées ont une section, tantôt circulaire, tantôt elliptique. On en a

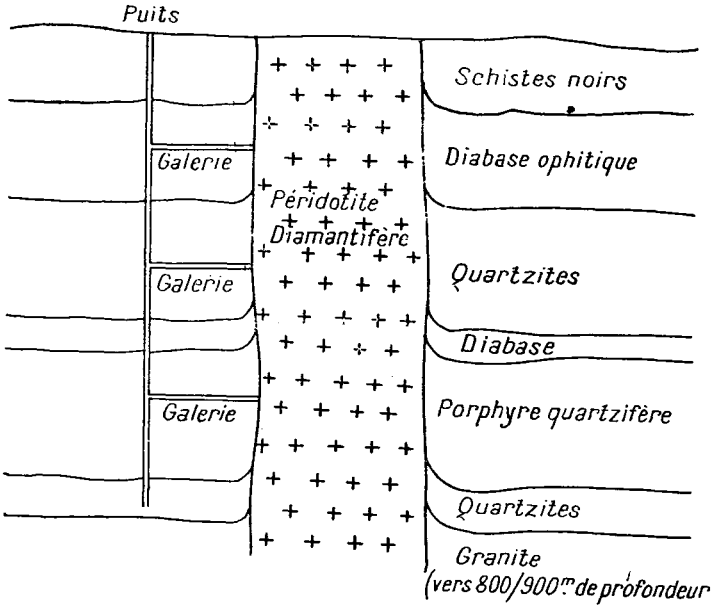


Fig. 41. — Coupe verticale d'une cheminée diamantifère.

trouvé de semblables, non diamantifères, dans l'Inde, en Sibérie (région de l'Angora) ; dans l'Afrique du Sud, elles sont nombreuses, mais la plupart sont inexploitables par suite de leur faible teneur.

La roche éruptive est venue dans ces cheminées avec une pression très violente qui a rebroussé les couches du Karoo au contact et produit parfois leur polissage. La figure 41 donne la succession des terrains encaissants : les cheminées sont infra-granitiques.

De nombreux fragments de roches des parois, tombés dans la cheminée lors du phénomène explosif, ont été englobés dans la roche diamantifère et remontés en moyenne de 200 mètres au-dessus de leur point d'origine.

La roche diamantifère qui remplit les cheminées est une *péridotite* très basique (kimberlite), formée de cristaux inaltérés de péridot et de pyroxène au milieu d'une pâte serpentinisée. Elle renferme, en outre, une grande abondance de magnétite, des grenats, du mica noir, de la tourmaline, etc.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Le diamant est très inégalement réparti et la teneur est faible : on a connu des teneurs de 1 carat (1 /5 gr.) par load (1 /2 m^3 ou 1.280 kilogrammes) dans les mines prospères. Aujourd'hui la teneur est descendue à 1 /3 carat par load. Le diamant est associé au graphite. Moissan a montré qu'il avait dû cristalliser sous une très forte pression ; il en a peut-être réalisé la synthèse en refroidissant en vase clos de la fonte de fer contenant du carbone en dissolution. Ce diamant de synthèse renferme un peu de silice.

La péridotite est exploitée par puits creusé, non dans la cheminée, mais dans les roches encaissantes, et par galeries horizontales qui vont recouper la cheminée (fig. 41).

En surface, la péridotite, qui porte le nom local de « blue ground », a subi, sur une vingtaine de mètres, une altération qui l'a transformée en une sorte de boue jaunâtre comparable à une boue glaciaire, le « yellow ground », où les diamants sont libres et montrent des phénomènes d'enrichissement. En profondeur, elle est beaucoup moins altérée, mais reste cependant serpentinisée.

Traitement. — Autrefois la péridotite fraîche était étalée sur de grands terrains appelés floors. Elle se désagrégeait peu à peu, désagrégation aidée d'ailleurs par des hersages et des labourages. Au bout de 2 ans environ, toute la roche était réduite en boues qu'on lavait et soumettait à une préparation mécanique. Il restait un sable à minéraux lourds (enstatite, grenat, péridot, magnétite), contenant les diamants et qui était soumis à l'inspection de blancs, puis de noirs.

Cette méthode, qui a l'inconvénient d'immobiliser les diamants pendant 2 ans, a été transformée. On ne laisse la roche que 6 mois sur le floors. Puis on la soumet à un broyage en plusieurs étapes. Après chaque opération, les fragments obtenus, de plus en plus fins, sont examinés soigneusement ; en général, les diamants apparaissent à la surface de la roche cassée : celle-ci se rompt selon les faces des diamants qu'elle renferme et qui ne sont pas brisés. A la fin du traitement, le sable restant est traité comme précédemment. Finalement, tous les diamants sont pesés, inscrits sur un registre et décrits ; on leur constitue un état civil.

6. Gisements d'alluvions. — Au **Brésil** et dans l'**Inde**, c'est dans des alluvions qu'on a trouvé les diamants, souvent en association avec les minéraux qu'on rencontre habituellement dans des granulites. Ces alluvions forment plusieurs niveaux étagés entre le fond des vallées et le sommet des plateaux. Au Brésil, on n'a guère exploité que les basses terrasses et on a dû laisser de côté, faute d'eau pour désagréger le minerai, les hautes terrasses d'ordinaire plus pauvres, mais qu'on a proposé de mettre en valeur en amenant de l'eau sur les plateaux.

D'où viennent ces diamants alluvionnaires ? Dans l'Inde, la question reste sans réponse, aucune diamant n'ayant pu être découvert en place. Par contre, au Brésil, il semble qu'on ait trouvé des diamants en place dans des roches acides, dans des *veines de quartz filoniennes* traversant des *itacolumites* (quartzites micacés provenant du remaniement des granulites). Si le diamant n'appartient pas là en réalité aux matériaux détritiques des terrains encaissants, on serait en présence d'un mode de forma-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

tion en milieu acide et nous serions obligés d'admettre l'existence de deux types de diamants : ceux qui ont cristallisé *en milieu basique* et ceux qui ont cristallisé *en milieu acide.*

COMPOSÉS HYDROCARBURÉS

A. — JAIS ET AMBRE

a) Le *Jais* ou *Jayet* est un lignite noir luisant composé de 75 % de carbone, 5 % d'hydrogène, 17 % d'oxygène, un peu d'azote et de soufre. Au microscope, il se montre entièrement constitué par un tissu ligneux où les espaces intercellulaires sont remplis par une substance amorphe. Sa légèreté et sa propriété de retenir un beau poli le font employer en bijouterie.

On le trouve en *Angleterre* (Yorkshire, Cleveland), en *Espagne* (Asturies, Galice), en *France* (Aude : gisements épuisés aujourd'hui ; Bouches-du-Rhône), en *Saxe*, en *Russie*, etc.

b) *L'ambre jaune* ou *succin* est une résine fossile, utilisée comme pierre d'ornement (articles de fumeurs, colliers). On en fait aussi un vernis gras. On y a vu autrefois la résine d'un pin spécial (*Pinus succinifera*) ; on admet aujourd'hui : soit le produit d'une altération chimique de débris végétaux quelconques ; soit la sécrétion morbide de pins atteints de « succinose ».

Les gisements les plus importants se trouvent dans les dunes sablonneuses du *Samland* dans la Prusse orientale (entre Kœnigsberg et Memel). L'ambre forme des nodules disséminés dans des sables glauconieux *oligocènes* recouverts par des sables stériles et par des lignites rapportés aussi à l'Oligocène. La couche de l'ambre, dite « Terre bleue », affleure parfois sur le bord de la mer ; elle est plus généralement au-dessous du niveau de la mer. On l'exploite par puits, par dragages sous-marins et par plongeurs. Un m^3 de sable donne 500 grammes d'ambre environ. On trouve fréquemment dans cette ambre de nombreux insectes, arachnides, qui ont fourni une précieuse contribution à la *faune éocène.* Les gisements, exploités depuis un temps immémorial, sont en voie d'épuisement.

Les couches du Samland se prolongent en *Courlande.*

On connaît d'autres gisements en *Birmanie* (base de l'Oligocène), en *Sicile* (Catane), au *Mexique.*

B. — SCHISTES BITUMINEUX

Ce sont des schistes, noirs ou brunâtres, à odeur caractéristique, clivables, chargés de débris organiques visibles et imprégnés d'hydrocarbures faisant corps avec eux. Leur nom est d'ailleurs mauvais ; car ils ne contiennent pas de bitume, mais des hydrocarbures donnant par distillation des huiles minérales. On pourrait les appeler plus justement

UNIVERSITÉ DE PARIS
GÉOLOGIE

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

des *naphto-schistes* ou *pyro-schistes*. Ils ont un double intérêt, d'abord par eux-mêmes, puis pour l'explication de la genèse du pétrole.

Les schistes bitumineux ont été exploités depuis longtemps, avant le pétrole. On a commencé dès 1830 à Autun, puis en Ecosse (1845) et en Saxe (1856). Ces trois districts ont continué leur exploitation. Mais, vers 1860, l'industrie des pétroles, de meilleure qualité et à meilleur marché, concurrença l'industrie des huiles. En France, celle-ci ne vit plus que d'une façon artificielle (droits protecteurs, etc.) et grâce à l'exploitation simultanée de mines de houille, d'ailleurs médiocres. Pendant la guerre, les schistes bitumineux ont retrouvé une certaine faveur.

La *proportion* d'huile brute qu'ils renferment est, d'ailleurs, variable ; on trouve en moyenne, en volume, à Buxières-la-Grue (Allier) 5 à 7 % ; à Autun 7 à 8 % ; dans le Dorsetshire (Ecosse), on a eu des schistes à 22 %, mais la moyenne est de 11 %. On a toutes les transitions jusqu'au boghead qui donne 55 % d'huile brute.

Le *traitement* est très simple ; on distille les schistes bitumineux dans des cornues verticales ; on amorce l'opération en chauffant au charbon ; puis le schiste lui-même, après distillation, fournit en brûlant la chaleur nécessaire pour distiller une charge nouvelle ; on recueille d'abord des eaux ammoniacales dont on extrait du sulfate d'ammoniaque vendu comme engrais, puis des gaz et enfin des huiles brutes. Celles-ci, par distillations successives et traitement à l'acide sulfurique et à la soude, donnent des essences diverses (gazolines...), des huiles lampantes (difficiles à brûler), des huiles lourdes, du goudron. En Saxe et en Ecosse, on en retire aussi de la paraffine.

Conditions de gisements. — Ce sont à peu près les mêmes conditions que celles du charbon auquel les schistes bitumineux sont souvent associés. Les schistes se sont formés en bordure des zones récemment plissées, pendant la période de trouble où s'établissent en *transgression* des lagunes, en communication fréquente avec la mer. Dans ces lagunes, se sont accumulés des débris de plantes et des restes d'animaux et de poissons, qui ont été rapidement recouverts par des vases. C'est probablement la décomposition, en vase clos et dans des eaux très concentrées (saumure), de matières surtout animales qui, sous des influences microbiennes, a produit les schistes bitumineux, tandis que la houille provient de la décomposition de matières végétales. Ces schistes s'intercalent au milieu de schistes et de grès stériles et peuvent s'associer à des dépôts gypso-salins lagunaires. Ils sont à peu près exempts de plissements.

Principaux gisements. — Les gisements de schistes bitumineux sont d'âges très divers : 1° Siluriens (ordoviciens) ; — 2° Dévoniens et Dinantiens ; — 3° Permiens et Liasiques ; — 4° Tertiaires.

1) Les gisements *ordoviciens* existent dans la transgression cambro-silurienne superposée au plissement huronien de la **plate-forme canadienne** (schistes à graptolites de la région du lac Huron, de la Baie d'Hudson et de la rivière d'Hudson).

2) On trouve des schistes bitumineux *dévoniens* en **Sibérie** et sur le bord de la **Mer Blanche**, après la phase des plissements calédoniens. En **Ecosse**, les schistes sont *dinantiens* et se présentent en transgression sur la chaîne calédonienne ; ils forment 2 niveaux au milieu de formations

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

gréseuses et calcaires et sont surmontés par le houiller productif (Lower-Coal measures).

3) Les gisements *permiens* dominent en **France** (1), où on rencontre les deux bassins de l'Allier (Buxières-la-Grue) et de la Saône-et-Loire (Autun), en bordure de la zone des plissements hercyniens.

Sur toute la lisière septentrionale du Massif Central, le Permien est transgressif et en discordance sur le Carbonifère ; il montre une stratification horizontale. Il débute par l'Autunien, constitué par des couches minces présentant des caractères de transition entre les faciès houillers et les faciès permiens proprement dits : c'est dans ces formations, généralement saumâtres, que se placent les schistes bitumineux d'Autun et de l'Allier. A l'Autunien succède le Saxonien, formé par des accumulations de grès rouges, à caractère continental (comparer le Rothliegende allemand). Puis vient la transgression triasique, qui déborde les couches permiennes.

Bassin de l'Allier. — Le Houiller de la région est nettement lacustre et composé de grès avec amas de houille. Le Permien est transgressif sur ce Houiller (fig. 42). L'étage des schistes bitumineux a encore, par sa flore,

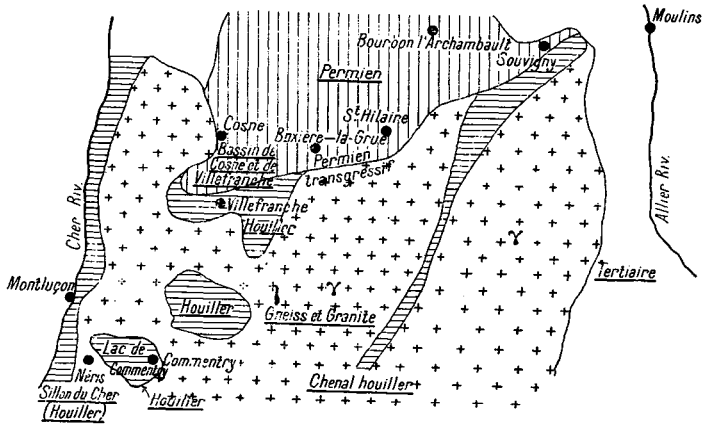


Fig. 42. — Carte géologique schématique du bassin de l'Allier.

des affinités stéphaniennes ; les schistes sont associés à des couches à poissons et à reptiles ; eux-mêmes renferment de nombreux poissons. A *Buxières-la-Grue*, et *Saint-Hilaire* l'exploitation porte sur un ensemble de couches de 2 m. 50 d'épaisseur dont 1 mètre de couches productrices.

Bassin d'Autun. — Le bassin d'Autun forme une vaste dépression complètement entourée d'une ceinture de terrains anciens recouverts par

(1) En 1929, la production française s'est élevée à 78.000 tonnes contre 210.000 en 1913 : le bassin d'Autun fournissant, à lui seul, 76.000 tonnes (contre 127.000 en 1913) et le Puy-de-Dôme 2.000 tonnes. Le bassin de l'Allier est à peu près abandonné : 160 tonnes en 1928 (contre 60.000 en 1913).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

endroits par du Secondaire (surtout Trias). Il est rempli de Houiller, qu'on voit affleurer à l'Est dans la région d'Epinac, surmonté par le Permien. Toute la cuvette semble avoir subi, pendant le dépôt du Houiller et du Permien, un approfondissement progressif.

Les schistes bitumineux se trouvent dans le Permien inférieur, au milieu d'un ensemble de couches qu'on divise en 3 étages :

a) *L'étage inférieur ou étage d'Igornay.* — A la base est une formation schisteuse de 75 mètres d'épaisseur, renfermant 3 bancs bitumineux exploités (Epaisseur : 3 mètres, 2 mètres, 7 mètres). La flore comprend surtout des espèces houillères ; toutefois l'apparition de *Callipteris* lui donne une tendance permienne. La faune a fourni de nombreux poissons et reptiles (*Paleoniscus, Protriton Petrolei,...*). On rencontre également dans cet étage des calcaires magnésiens avec coquilles d'eau douce.

b) *L'étage moyen ou de la Comaille.* — Formation grèseuse avec une

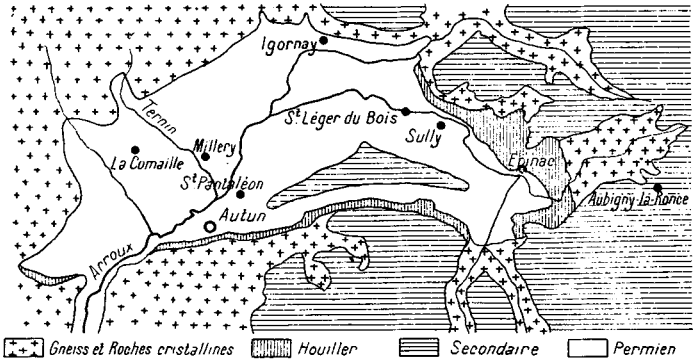


Fig. 43. — Carte géologique schématique du bassin d'Autun.

couche de houille et plusieurs couches bitumineuses. La plus importante, « la grande couche » de l'Autunois, est située à la base de l'étage. La flore est nettement permienne (grande abondance de bois silicifiés) ; on y a découvert un mollusque terrestre : *Pupa Walchiarum*, le premier signalé dans les terrains houillers ou permiens d'Europe. Faune très riche comparable à celle de l'étage d'Igornay.

c) *L'étage supérieur ou de Millery.* — Essentiellement schisteux avec beaucoup de petits niveaux bitumineux et une couche de boghead de 0 m. 25 exploitée pour la fabrication du gaz d'éclairage (1 m³ de boghead donne 500 m³ d'un gaz très éclairant). Beaucoup de bois silicifiés.

Les schistes sont recouverts en discordance par le grès rouge saxonien.

Dans le bassin de **Brive** existent des schistes semblables, d'âge permien, mais non exploitables.

Dans le **Mansfeld** (Allemagne) les schistes bitumineux du Zechstein (*Permien sup.*), qui se placent au-dessus du grès rouge du Rothliegende, sont en même temps cuprifères et exploités pour le cuivre.

4) Les gisements *tertiaires* sont représentés en **France** par le bassin de *Menat* dans le Puy-de-Dôme. C'est une petite dépression creusée dans les

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

micaschistes et remplie par des dépôts lacustres sannoisiens qui ont fourni une flore et une faune très intéressantes. Ces dépôts consistent en schistes brun noirâtre, tendres, clivables, à grain très fin, imprégnés d'hydrocarbures et de matières organiques. En les chauffant à l'air libre, on obtient des cendres essentiellements formées de silice qui sont vendues sous le nom de tripoli. Lorsqu'on calcine le schiste en vase clos, on recueille du noir utilisé pour les mêmes emplois que le noir animal.

Enfin, en **Saxe**, dans la région de *Weissenfels*, on rencontre, dans les formations lignitifères *oligocènes*, une couche de lignite bitumineux, formée d'une matière pulvérulente, analogue à du bois pourri, renfermant une quantité notable de paraffine. La couche est épaisse de 18 à 20 mètres ; la partie supérieure rend à la distillation 6 à 7 % d'huile brute, solide à la température ordinaire, dont on extrait des huiles rectifiées (éclairage) et de la paraffine.

C. — PÉTROLE

Le pétrole est un mélange d'hydrocarbures saturés (forméniques) et non saturés (naphténiques).

1. Usages. — Il a de nombreuses applications industrielles qui augmentent de jour en jour (éclairage, chauffage, graissage, alimentation des moteurs). Ses principales caractéristiques sont : le *point d'inflammabilité* (température à laquelle les vapeurs qu'il donne sont susceptibles de s'enflammer). le *point d'ignibilité* (température à partir de laquelle il continue à brûler) (les règlements français défendent l'emploi de vapeurs susceptibles de s'enflammer au-dessous de 35°), la *capillarité* qui permet au pétrole de s'élever dans les mèches de lampes, la *densité* qui diminue rapidement quand la température s'élève (moyenne : 0,83 à 0,88), le *pouvoir calorifique* qui est très élevé, supérieur à celui des charbons à poids égal (12.000 calories pour le pétrole ; 8.500 pour les houilles à gaz). Cette dernière qualité est intéressante, surtout pour les navires (emploi des mazouts ou résidus de pétrole).

Enfin le pétrole présente, sur les autres combustibles, l'avantage d'être beaucoup plus facile à transporter et à emmagasiner.

2. Extraction, traitement. — L'extraction se fait par *sondages* d'où le pétrole sort, tantôt par pompage, tantôt par jaillissement naturel. Le plus souvent il est jaillissant, surtout au commencement de l'exploitation (Caucase). Les sondages pétrolifères doivent être *tubés* pour deux raisons : maintenir les terrains ébouleux ; isoler les nappes aquifères, supérieures à la nappe pétrolifère, qui risqueraient de refouler l'huile en profondeur, comme il arrive fréquemment au Mexique. Les sondages doivent être assez rapprochés pour ne laisser aucun point non drainé ; trop près, ils se nuisent mutuellement ; d'ailleurs, l'abondance du pétrole varie beaucoup entre points voisins.

Le procédé par sondages perd beaucoup de pétrole ; aussi a-t-on tenté la méthode d'exploitation par *puits* et *galeries* qui, en raison de son prix

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

élevé, n'a pu réussir que dans les conditions très spéciales de l'industrie française, en Alsace.

Le pétrole une fois extrait, il reste à le transporter au point de vente et à le traiter. Le transport est une opération délicate et importante qui a été l'objet de perfectionnements incessants. Au début, en Pennsylvanie, on ne savait que faire des masses de pétrole tirées. On imagina les *wagons-citernes*, les *bateaux-citernes* et enfin les *pipelines* qui sont des tuyaux reliant le centre d'extraction au centre de traitement ou d'embarquement, dans lesquels on refoule l'huile par des pompes. Les premiers essais de pipelines (1865) se heurtèrent au début à de grosses difficultés : le pétrole avait tendance à traverser le tuyau pour se répandre dans les terrains voisins et s'échappait par les joints.

L'huile brute est *distillée* et donne successivement : des gaz non condensables ; de l'éther de pétrole passant entre 46° et 70° ; de l'essence minérale (de 70° à 120°) ; de l'huile lampante (de 150 à 280°) ; de l'huile lourde (de 300° à 400°) et de la paraffine ; les résidus sont des goudrons, du coke de pétrole et quelquefois de la vaseline. Les huiles lourdes ont pris de la valeur depuis qu'elles sont utilisées dans les moteurs Diesel. (De là l'importance actuelle des pétroles de Californie qui contiennent surtout des huiles lourdes).

3. Historique — Principaux centres pétrolifères. — C'est vers 1850 que furent forés les premiers sondages pétrolifères en Pennsylvanie. En 1854 se fonda la première société d'exploitation et, entre 1858 et 1860, se produisit le grand rush des travailleurs du pétrole. Dès 1860, on obtint 200 barils par jour ; au début de 1871, 700 ; à la fin de la même année, 7.000.

La Pennsylvanie fut donc le premier grand centre mondial de production : on y a trouvé tout de suite quelques sources remarquables qui ont donné au début 2 à 3.000 barils par jour. L'extraction annuelle est passée rapidement de moins de 4 millions de barils en 1870 à 31 millions en 1883.

C'est pendant cette période qu'on a découvert à peu près toutes les régions pétrolifères du monde, pour lesquelles on se contentait de sondages très superficiels. Le seul champ qui put contrebalancer à l'époque les gisements de Pennsylvanie a été découvert au Caucase en 1879. Plus récemment, une campagne de sondages profonds a porté sur les régions anciennement explorées et sur quelques régions nouvelles : Texas, Oklahoma, Mexique, Vénézuela, Perse, Mésopotamie, etc.

Citons parmi les grands centres pétrolifères :

Aux États-Unis :

Le bassin des *Appalaches* (*Pennsylvanie, New-York, Virginie occidentale, Ohio, Kentucky*), longtemps le plus considérable du monde, donnant une bonne huile lampante, mais manifestant des signes d'épuisement partiel depuis 1890 (35 millions de barils environ en 1929) ;

La *Californie*, dont la production, d'abord peu importante vers 1880-1890, est devenue une des plus fortes du globe (290 millions de barils en 1929 ; 230 millions de barils en 1930, d'une huile très dense, utilisée pour le chauffage et dans les moteurs) ;

Le *Texas*, qui, parti de zéro avant 1896, atteignit 40 millions de barils

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en 1905, retomba à 19 l'année suivante et, grâce à un accroissement prodigieux en ces dernières années, dépasse même à l'heure actuelle la Californie (environ 300 millions de barils en 1929 et en 1930) ;

L'*Oklahoma*, 255 millions de barils en 1929, 215 millions en 1930 ;

Le *Kansas*, dont les gisements dans des calcaires fissurés donnent encore 42 millions de barils ;

La *Louisiane*, 23 millions de barils en 1930 ;

L'*Arkansas*, dont la production décroît rapidement, (80 millions de barils en 1925, 20 millions en 1930) ;

Le *Wyoming*, 18 millions de barils en 1930 ;

Les gisements très importants du *Mexique* découverts en 1912, 46 millions de barils.

En Amérique du Sud :

Le *Vénézuéla* qui, mis en valeur depuis 1917, a vu sa production monter rapidement à 137 millions de barils en 1929 et en 1930 ;

La *Trinidad*, 9 millions de barils en 1929 et en 1930 ;

La *Colombie*, dont la production, inexistante avant 1922, est, en 1930, de 20 millions de barils ;

L'*Argentine*, exploitée depuis 1908, 9 millions de barils en 1929 et en 1930.

En Europe :

L'*Alsace*, où des mines d'asphalte existaient déjà avant 1870 à Péchelbronn, (500.000 barils).

Le *Hanovre*, (700.000).

La *Galicie* (Pologne), dont la production doubla de 1906 à 1910, (15 millions de barils en 1909), pour redescendre ensuite (5 millions de barils en 1929) ;

La *Roumanie*, actuellement en grand essor, 35 millions de barils en 1929, 40 millions en 1930 ;

Le *Caucase* où la mise en valeur s'est déplacée de l'Est vers l'Ouest, depuis les districts de Bakou jusqu'à Grosny et Batoum, ensemble qui a connu une ère de prospérité vers 1901 et semble vouloir reprendre sa place parmi les grands producteurs de pétrole, 100 millions de barils en 1929 ; 135 millions en 1930.

En Asie, dans les plissements tertiaires :

Le *Turkestan* ; la *Mésopotamie* ; la *région du golfe Persique* (depuis 1913) ; la *chaîne Birmane* ; *Java* ; *Sumatra* ; le *Japon* ; *Shakaline*.

(Il y a peut-être aussi des possibilités d'exploitation pétrolifère en Sibérie où l'on a constaté des suintements dans le bassin de la Léna.)

Il est curieux de constater la pauvreté générale de l'Afrique en hydrocarbures : il n'y a que de petits suintements dans l'Ouest-Algérien, le long de la Côte de Guinée et des gisements en *Egypte* sur les bords de la mer Rouge.

Les champs pétrolifères *s'épuisent* très rapidement, entraînant un déplacement des centres d'extraction et d'industrie. En effet, le pétrole n'est pas d'origine éruptive : ses réserves ne se renouvellent pas, comme on pourrait le croire, et sont loin d'être infinies. Il est tout à fait localisé en profondeur et les points exploitables très restreints. Ainsi, le long des Car-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

pathes, on trouve du pétrole un peu partout, cependant il n'y a guère que deux centres intéressants et exploitables (Boryslaw et Prahova).

D'autre part, la pression des gaz qui fait monter le pétrole dans les trous de sondage, si forte au début qu'elle entraîne souvent un gaspillage d'huile, diminue vite ; il en résulte que le pétrole cesse de jaillir spontanément et ne se diffuse plus à l'intérieur du sol ; tout sondage est donc voué à un épuisement rapide et doit être amorti en un délai très court ; le niveau pétrolifère lui-même devient stérile en peu de temps.

On peut essayer de réactiver un puits épuisé par différents procédés (torpillage, pompage) ; mais il y a avantage à s'approfondir pour rencontrer un autre niveau, plus riche et qui donne un meilleur rendement moyen, et ainsi jusqu'à épuisement total de tous les niveaux de la région. Par exemple, il a fallu abaisser le niveau moyen exploité en Pennsylvanie ; certains districts y sont déjà épuisés et la production des Etats-Unis ne se maintient que grâce à l'incessante mise en œuvre de nouveaux centres. Il en a été de même au Caucase : on a dû creuser de nouveaux puits plus profonds (ce qui augmente les frais) ; la proportion des puits stériles y croît constamment. Nous en sommes à l'époque où la découverte de districts encore inexploités compense la disparition de centres frappés de stérilité et l'on s'inquiète actuellement d'une surproduction. Mais cette situation ne durera pas longtemps ; on commence à avoir exploré toutes les régions où des suintements en surface révèlent le combustible en profondeur et, dans les autres, les probabilités de rencontres utiles sont faibles.

Il est probable que le pétrole sera le *premier minéral qui viendra à manquer* à notre civilisation.

4. Statistique. — Du fait de ces épuisements rapides et de la mise en œuvre de gisements capables de fournir d'énormes quantités de combustibles en très peu de temps, la production pétrolifère est essentiellement variable et sujette à des à-coups très brusques. Elle augmente avec une grande rapidité tenant à l'ouverture des nouveaux centres. La production mondiale (1), qui était approximativement de :

En 1860	70.000	tonnes
» 1880	4.000.000	»
» 1890	10.000.000	»
» 1900	24.500.000	»
» 1910	45.750.000	»

a plus que quadruplé depuis cette dernière date :

En 1920	89.000.000	tonnes
» 1924	130.000.000	»
» 1926	140.000.000	»
» 1928	170.000.000	»
» 1929	190.000.000	»

(1) Les nombres, évalués en barils américains de 42 gallons ou 159 litres, ont été convertis en tonnes métriques, en prenant pour poids du baril, à la densité moyenne de 0,810, 129 kilogrammes.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Dans les dernières années, l'accroissement de la production a été moins rapide.

La production se répartit ainsi par pays et dans l'ordre d'importance (en 1929) ;

Etats-Unis : 130.000.000 tonnes, c'est-à-dire plus des 2/3 du total (28.750.000 tonnes en 1912) ;

Vénézuela : 17.700.000 tonnes (centre récent qui produisait en 1920 à peine 60.000 tonnes) ;

Russie : 13.300.000 tonnes (près de 12.000.000 en 1904 ; 3.000.000 en 1920) ;

Mexique : 5.800.000 tonnes (L'épuisement des gisements et les difficultés de la situation politique expliquent la baisse de la production qui, partie de 2.000.000 tonnes en 1912, s'est élevée à 23.000.000 tonnes en 1922) ;

Perse : 5.400.000 tonnes (surtout destinées à l'Amirauté Britannique — ne produisait rien avant 1914) ;

Indes néerlandaises : 4.900.000 tonnes (1.500.000 tonnes en 1910 — sur tout Java) ;

Roumanie : 4.500.000 tonnes (1.600.000 en 1912) ;

Colombie : 2.600.000 tonnes, (40.000 tonnes seulement en 1922) ;

Pérou : 1.700.000 tonnes (225.000 en 1912) ;

Argentine : 1.200.000 tonnes (récent, 6.000 tonnes en 1912) ;

Trinité : 1.120.000 tonnes ;

Indes Anglaises : 1.100.000 tonnes (900.000 en 1912, stationnaire) ;

Bornéo : 680.000 tonnes ;

Pologne (Galicie) : 640.000 tonnes (en décroissance : 1.700.000 tonnes en 1908 ;

Japon : 260.000 tonnes (420.000 en 1920) ;

Egypte : 240.000 tonnes ;

Allemagne : 91.000 tonnes (Hanovre) ;

France : 64.000 tonnes (Alsace) ;

5. Géologie des gisements. — *L'origine du pétrole* reste discutée. On a émis à ce sujet deux théories.

a) L'origine volcanique, soutenue par les chimistes ;

b) L'origine sédimentaire et organique, admise par les géologues.

On a même cru un moment que la différence de composition entre les pétroles formés d'hydrocarbures non saturés, comme ceux du Caucase, et les pétroles formés d'hydrocarbures saturés, comme ceux de Pennsylvanie, tenait à une différence d'origine : les premiers étaient attribués à une formation volcanique, les seconds à une formation sédimentaire. Il n'en est rien, car des analyses plus complètes ont montré, dans les uns et les autres, les deux types d'hydrocarbures et on connaît aujourd'hui des pétroles intermédiaires formés d'un mélange, en parties à peu près égales, des deux sortes d'hydrocarbures. D'ailleurs l'expérience de Sabatier qui a réalisé la synthèse du pétrole en faisant agir, sur du nickel réduit, vers 200°, de l'acétylène et de l'hydrogène, a permis d'obtenir, tantôt des hydrocarbures saturés, tantôt des hydrocarbures non saturés, tantôt des mélanges, selon qu'on opérait avec excès d'hydrogène ou non.

Les observations géologiques sont nettement en faveur de l'origine sédi-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

mentaire. Dans la plupart des cas, on ne constate pas de rapport étroit entre les gisements et le volcanisme. Par contre, le *rapprochement intime entre le pétrole et le sel* (plus généralement les gîtes gypso-salifères) est un argument très fort en faveur de l'origine sédimentaire. Les nappes d'eau salée associées aux hydrocarbures proviennent de gisements de sel contemporains : elles peuvent quelquefois refouler le pétrole en profondeur. Réciproquement, il n'est pas rare de rencontrer, dans les mines de sel gemme, des dégagements de gaz combustibles qui peuvent servir à l'éclairage des mines. La seule objection sérieuse à la théorie sédimentaire est la rencontre, sur le même point, de nappes pétrolifères de plus en plus profondes. Mais cela tient surtout à la remise en mouvement de ce corps.

La théorie la plus vraisemblable soutient que le pétrole s'est formé en *bordure des régions plissées*, généralement après le phénomène de plissement, dans la zone soumise à des *transgressions*. Là se sont établies momentanément des dépressions *lagunaires* où s'accumulaient des débris organiques (surtout animaux) qui, recouverts par des vases, se sont décomposés en vase clos par l'intervention des microbes. Le bain de saumure a peut-être joué un rôle dans cette décomposition.

Les gisements pétrolifères présentent toutes les apparences de montées internes. En effet, grâce à la capillarité et à la pression des gaz qui l'accompagnent, le *pétrole est essentiellement mobile* et est soumis à des mouvements continuels qui tendent à le faire monter par des fissures : il s'infiltre dans les niveaux perméables et poreux et y forme des nappes. On a ainsi, dans les régions pétrolifères, au dessus du gisement originel, une série de niveaux adventifs superposés, séparés par des strates stériles. L' accumulation du pétrole dans une couche poreuse est plus facilement et plus complètement réalisée quand cette strate est surmontée elle-même de couches imperméables, comme les schistes, qui s'opposent à l'ascension du liquide (fig. 44).

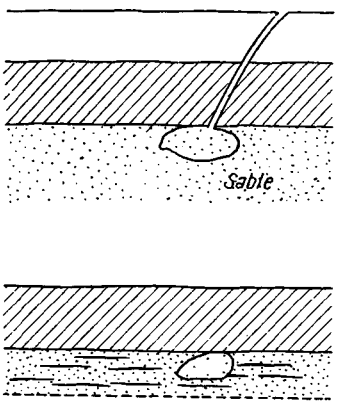


Fig. 44. — Coupe schématique d'un gisement pétrolifère.

Les terrains favorables à l'emmagasinement des hydrocarbures liquides sont, ou des sables, ou des grès, ou des calcaires fissurés. C'est dans des grès et des sables que se trouvent les 3 niveaux très constants de Pennsylvanie ; c'est aussi dans des sables tertiaires, plus ou moins mélangés d'argile, que se rencontrent les niveaux de Bakou, de Californie et de Roumanie. Si les alternances de grès et de strates imperméables sont épaisses et régulières. le gisement est bon ; si elles sont peu épaisses quoique régulières, il y a des chances pour que le gisement ne soit pas important. Enfin, si l'on a affaire à des grès compacts, fissurés, recouverts par un toit de schistes, les apparences sont belles, mais les résultats industriels médiocres. En terrains calcaires, toujours très diaclasés, le pétrole ne s'accumule que dans le réseau de diaclases, donnant lieu à un champ très irrégulier ; par contre,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

on peut trouver, dans ces couches, des réservoirs intérieurs importants dont la production, limitée, peut néanmoins être temporairement fabuleuse (Mexique, Texas). La présence du pétrole exploitable tient, je le répète, non seulement à l'existence d'une couche originelle où les hydrocarbures se sont formés, mais encore aux possibilités d'emmagasinement par montées dans des couches superposées, régulières et poreuses.

On a admis longtemps comme un dogme que, lorsque la région pétrolifère a été plissée, le *pétrole s'accumule sous les voûtes anticlinales*, c'est-à-dire aux points les plus élevés de la strate imprégnée. C'est sur les axes anticlinaux qu'il faudra forer les sondages, avec le plus de chances de succès ; sur ces emplacements, les sondages sont d'ailleurs moins profonds pour atteindre le niveau à hydrocarbures et moins coûteux (fig. 45) ; enfin, grâce

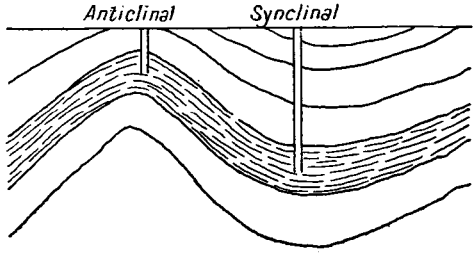


Fig. 45. — Coupe montrant la relation du pétrole avec les anticlinaux.

à la pression des gaz, ils sont généralement jaillissants. Cependant cette théorie est aujourd'hui battue en brèche ; du moins sous sa forme trop absolue.

On discute aussi sur l'avantage ou l'inconvénient d'avoir un *terrain très fracturé*. Ces fractures, outre qu'elles gênent le travail du sondage, ont pu amener une lente déperdition du pétrole en surface, quelquefois l'épuisement de niveaux. Cependant, des fractures profondes semblent favoriser, dans certains cas, l'ascension du pétrole d'une région. On a même pu donner à cette idée une application pratique et réactiver des puits, qui n'étaient plus jaillissants, en faisant exploser de la dynamite au fond de ces puits : les couches sont désorganisées, brisées par l'explosion, et du pétrole peut arriver par ces nouvelles fissures. (Le procédé est interdit dans plusieurs pays ; il est possible qu'il donne des résultats tout à fait opposés à ceux que l'on attendait.)

En surface, un gisement pétrolifère peut se trahir par des *suintements* qui orientent les premières recherches. C'est le point de départ le plus habituel des recherches, mais il faut bien se rendre compte que l'on commet là un cercle vicieux. Des suintements abondants n'ont pu manquer d'entraîner une déperdition lente du pétrole au point même où ils se produisent. Ils montrent cependant la possibilité de rencontrer du pétrole profond de même origine dans les points voisins.

Une dernière remarque : *le pétrole augmente de densité au fur et à mesure qu'il monte vers la surface*, par suite de phénomènes d'oxydation. On trouve généralement des produits bitumineux et asphaltiques dans la zone super-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

ficielle. Puis, quand on s'enfonce, on rencontre d'abord des bitumes liquides, plus bas des huiles lourdes et enfin des huiles de plus en plus légères.

6. Description des gisements. — L'ordre suivi est destiné à faire ressortir l'âge probable des gîtes pétrolifères (si problématique qu'il puisse être souvent), en même temps que leurs relations avec les grandes zones tectoniques de plissements :

I. — Zone correspondant aux grandes plates-formes primitives : dépôts siluriens ou dévoniens :

a) Plate-forme canadienne : les gisements sont nombreux et riches au pourtour : Canada, Ohio, Indiana, Illinois, Appalaches, Kentucky, Kansas, Lacs canadiens ;

b) Plate-forme sibérienne : jusqu'ici on n'y a pas trouvé de grands gisements : Mer Blanche (Chaîne de Timan ; presqu'île de Kanin), Région de Baïkal.

II. — Chaîne hercynienne : gisements permiens ou triasiques. On peut leur associer les schistes bitumineux : France (Gard, Hérault, Jura, etc.), Allemagne (Hanovre), Algérie.

III. — Chaînes crétacées ou tertiaires : les gisements se trouvent dans les parties basses en bordure des chaînes : Colorado, Wyoming, Utah, Californie, Texas, Mexique, Cuba, Haïti, Barbades, Trinidad, Vénézuela, Colombie, Pérou, Argentine, Alsace, Tyrol, Galicie, Roumanie, Apennins, Caucase, Turkestan, Egypte, Mésopotamie, Perse, Birmanie, Sonde, Japon. Ce sont de beaucoup les plus nombreux.

I. — Pétroles des zones calédoniennes

1° Etats-Unis. — On connaît aux Etats-Unis deux groupes de gisements :

a) Ceux de l'Est, le long de la plate-forme canadienne ;

b) Ceux de l'Ouest, en rapport avec les plissements tertiaires (étudiés plus loin). Ce deuxième groupe contraste avec le premier : le pétrole s'y trouve dans les formations crétacées ou tertiaires et il présente une constitution différente.

De l'Ouest à l'Est des Etats-Unis, on rencontre successivement : la Chaîne Côtière et la Sierra Névada qui sont constituées par du crétacé et du tertiaire percés de roches volcaniques et contenant quelques massifs granitiques ; puis des Hauts Plateaux composés de massifs surélevés ou affaissés, séparés par de grandes failles et renfermant d'importants gîtes métallifères (Grand Bassin, Colorado) ; puis, après la région secondaire et tertiaire du Nébraska, la cuvette du Mississipi constituée par du Carbonifère recouvert par endroits par des formations éocènes. Les terrains primaires, dévoniens et siluriens, affleurent ensuite en larges plis anticlinaux. Enfin, non loin de l'Atlantique, se dresse la chaîne granitique des Appalaches (fig. 47).

Les gisements pétrolifères primaires sont situés entre les Alleghanys et les hauts plateaux de l'Ouest dans des formations gréseuses qui ne sont pas pas toutes du même âge et qui s'échelonnent du Silurien au Carbonifère.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les plus riches sont dans le *Dévonien supérieur et à la base du Dinantien.* Si on admet que tous ces pétroles ont une origine commune, c'est au moins

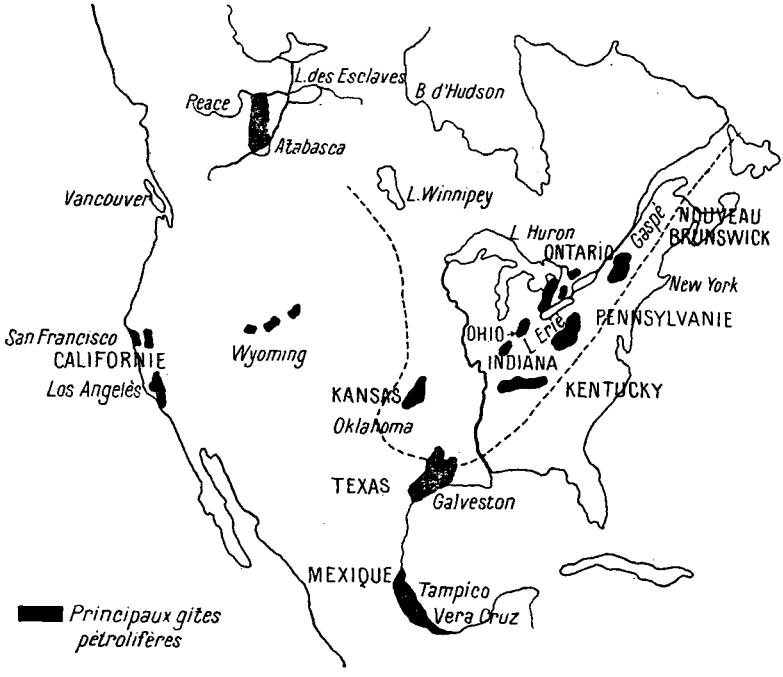


Fig. 46. — Carte schématique des gîtes pétrolifères des États-Unis.

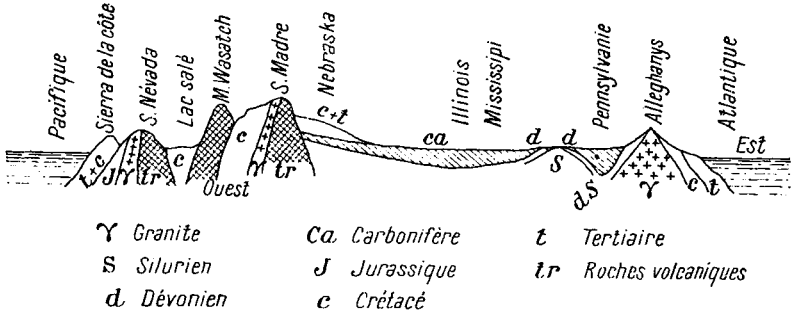


Fig. 47. — Coupe schématique des États-Unis (de l'Est à l'Ouest).

dans le Silurien qu'il faut la placer et non dans le Dévonien. La succession des niveaux pétrolifères de toute la région orientale des Etats-Unis est la suivante :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Permien		: Stérile
Carbonifère	sup. (Stéphanien)	Houiller productif (Coal Measures).
	moy. (Westphalien)	
	inf. (Dinantien)	: *Niveau supérieur pétrolifère.*
Dévonien	*sup.* (Famennien)	*Niveau pétrolifère le plus important* (Grès de Venango, de Warren, de Bradford).
	moy. (Givetien, Eifélien)	*Niveau pétrolifère du Canada.*
	inf. (Coblentzien Gédinnien	Improductif.
Silurien	sup. (Gothlandien)	: Improductif.
	inf. (Ordovicien)	: *Niveau pétrolifère de l'Ohio.*
Cambrien		: Grès stérile.

Les gisements s'alignent selon deux traînées : l'une qui part de la *Presqu'île de Gaspé* et du *Nouveau Brunswick* au Canada, comprend, entre les deux lacs Huron et Erié, les gisements canadiens de l'*Ontario*, dans les calcaires du Dévonien moyen, passe à l'Ouest du lac Erié, se dirige vers le Sud-Ouest, vers l'Ouest de l'*Ohio*, l'*Indiana* et l'*Illinois* ; l'autre, plus orientale et plus importante, qui comprend le bassin des *Appalaches* (New-York, Pennsylvanie, Est de l'Ohio, Virginie Occidentale), le *Kentucky*, le *Tennessee*, se recourbe vers l'Ouest (*Territoire indien, Oklahoma, Kansas*).

Dans l'*Ouest de l'Ohio*, les conditions sont à peu près les mêmes que dans les gîtes tertiaires du Texas. Le pétrole se trouve en poches irrégulières dans les fissures du calcaire dolomitique ordovicien de Trenton, au-dessous d'un manteau imperméable (schistes d'Utica). Exploité dès 1885, le bassin s'est étendu jusqu'en 1905 ; donnant une production de 25 millions de barils en 1906 ; puis il a subi une chute très rapide (5 millions de barils en 1910).

Dans l'*Illinois*, mis en exploitation depuis 1905, les puits ont une profondeur moyenne de 200 mètres ; les hydrocarbures sont dans des grès comme dans le bassin Appalachien.

Le *Bassin des Appalaches* a joué un rôle très important dans la naissance de l'industrie pétrolifère. De 1860 à 1910, il a produit 90 millions de tonnes dans les seuls Etats de New-York et de Pennsylvanie. Il a eu une constance remarquable. Mais la production de chaque forage diminue actuellement. Sur les 75.000 sondages effectués en Pennsylvanie, deux tiers ont été productifs. Les niveaux se trouvent dans le Dévonien supérieur et un peu dans le Dinantien, comme l'indique cette coupe.

Houiller de Pittsburg Houiller stérile Houiller inférieur des Alleghanys	pas de pétrole [1].

[1] Des observations rapides avaient fait croire que le pétrole était associé avec le houiller et qu'il résultait de la distillation du houiller. Cela est absolument inexact.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Dinantien	*Grès pétrolifère* : relativement poreux (120 m.). (On a rapidement cessé d'exploiter).
	Schistes (140 mètres).
Dévonien	Schistes et grès compacts (120 mètres).
	1re Zone de *grès pétrolifère* (15 à 80 mètres).
	Schistes stériles (100 mètres).
	2e Zone de *grès pétrolifère* (10 à 100 mètres).
	Schistes imperméables (100 mètres).
	3e Zone de *grès pétrolifère* (25 mètres).

Ces différents niveaux ont été recoupés par approfondissements successifs à mesure que les niveaux supérieurs s'épuisaient ; on a traversé chaque fois, entre deux bancs de grès poreux pétrolifères, une épaisseur de schistes stériles et on a trouvé une huile de plus en plus légère en profondeur. Malgré la régularité du bassin, il ne faut pas 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 passer en moyenne un tiers de puits stérile. Les puits sont descendus jusqu'à 600 et même 1.000 mètres ; jamais ils n'ont donné de résultats extraordinaires, comme au Mexique où certains puits ont fourni jusqu'à 100.000 barils par jour, ou comme au Caucase. Le rendement moyen est de 11 barils par jour et par puits.

Dans le *Kentucky* et le *Tennessee*, le pétrole provient des mêmes niveaux qu'en Pennsylvanie ; les 2/3 des puits sont stériles. Le Tennessee ne produit presque plus rien aujourd'hui (19.000 barils en 1930) : on cite le cas curieux d'un champ de ce district 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 du premier restèrent absolument stériles.

Dans le *Territoire indien* et le *Kansas*, dont le développement date de 1905, la coupe est à peu près analogue à celle du bassin Appalachien ; mais, en outre, on y rencontre un premier niveau dans le Carbonifère supérieur, pétrole qui paraît venir d'un niveau inférieur.

Carbonifère supérieur	Calcaires et Schistes divers.
	Sables pétrolifères.
Dinantien	Calcaire.
	Niveau pétrolifère (*principal niveau*) formé d'une alternance de schistes et de grès pétrolifère (env. 130 mètres).
Dévonien	Calcaire du Mississipi avec inclusions de silex.
Silurien	Schistes et sables pétrolifères ordoviciens trouvés à 530 mètres de profondeur ; peut-être niveau unique et originel du pétrole.

2° Canada. — Les gisements canadiens sont très peu importants jusqu'ici. Outre le district déjà signalé de l'Ontario, des recherches et des sondages ont constaté l'existence du pétrole sur une grande longueur, à l'Ouest de la plate-forme primitive, dans la *région des lacs* (Mackensie, Lac des Esclaves, Peace River, Atabasca), où le soubassement ancien est recouvert localement par une transgression crétacée.

3° Russie. — On retrouve des formations pétrolifères en bordure de la plate-forme sibérienne dans les mêmes conditions qu'en Amérique. Une

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

campagne de sondages, effectués sur des suintements superficiels et descendus à 180 mètres, a permis de découvrir une série d'imprégnations, le long de la rivière *Ouchla* (sous-affluent de la Petchora), sur le bord est de la Chaîne de *Timan* (Nord-Ouest de l'Oural), avec prolongement dans la presqu'île de *Kanin*. Les imprégnations portent sur des niveaux de grès marneux dévoniens, alternant avec des schistes. Aux affleurements, une couche de schistes visible est si imprégnée d'hydrocarbures qu'elle brûle facilement en produisant beaucoup de fumée ; elle a reçu le nom de « Domanik ».

4° **Sibérie.** — On peut signaler ici quelques petits suintements en relation probable avec la transgression dévonienne qui a donné lieu à toute la série des dépôts salins du bassin de la *Léna*.

II. — Pétrole des zones hercyniennes

La zone hercynienne ne comprend nulle part de grande venues pétrolifères ayant une réelle importance industrielle,

1° **France.** — Les régions françaises où il y a des gisements ou des indices pétrolifères sont : les Pyrénées, l'Hérault et le Gard, la Limagne, le Bugey, et l'Alsace. Sauf en Limagne et en Alsace où l'âge tertiaire des hydrocarbures n'est guère contestable, nous sommes mal renseignés sur l'époque à laquelle se sont constitués les autres groupes que nous réunissons ensemble.

Dans les *Pyrénées* (Landes, Basses-Pyrénées), malgré l'âge tertiaire des plissements principaux, les indices hydrocarburés sont en rapport probable avec une zone gypso-salifère néotriasique (avec ophites). A Gaujac et Bastennes, on a exploité du bitume avant 1850.

Dans l'*Hérault*, à *Gabian*, sur le flanc sud-est de la Montagne Noire, des sondages, effectués sur des suintements connus depuis longtemps, ont atteint un niveau pétrolifère, assez médiocre et très localisé, dans les grès du Trias inférieur, sous les couches imperméables du Trias supérieur.

Dans le *Gard*, existent, à l'est d'Alès et de la bordure faillée du massif primaire, des formations asphaltiques dont il sera question plus loin. Elles se trouvent dans l'Oligocène, mais il y a des chances pour que l'origine des hydrocarbures soit plus profonde.

Dans le Massif Central, on connaît aussi les hydrocarbures permiens de l'*Allier* et de la *Saône-et-Loire*, déjà décrits.

Dans l'*Ain* et même dans la *Haute-Savoie* voisine, entre le Crédo et Seyssel et dans la région d'Annecy (Lovagny), il existe une série de pointements hydrocarburés (asphaltes, bitumes) en rapport avec des plis très réguliers (voir plus loin asphaltes et bitumes), surtout dans les formations secondaires (Urgonien). L'imprégnation des calcaires a dû avoir lieu après leur formation. Quelques sondages ont été faits sans résultats : un seul a donné des gaz. S'il y a eu du pétrole dans la région, il a dû être disséminé par les dislocations.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

2. Algérie. — On a signalé un peu de pétrole dans l'Ouest de l'Algérie, à *Relizane* et *Tliouanet* (province d'Oran) près de Mostaganem, en relation avec des gypses *triasiques* dans des conditions assez favorables. Seul, jusqu'ici, un petit centre de production a été créé.

3. Maroc. — Des suintements pétrolifères ont été reconnus et explorés dans les régions du Gharb et du Tselfat. Leur valeur industrielle reste à démontrer

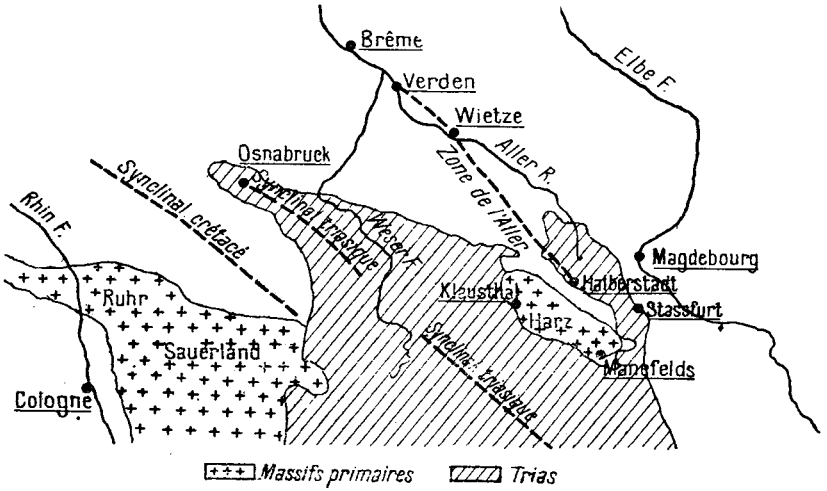


Fig. 48. — Carte schématique du Hanovre, du Harz et de la région de Stassfurt.

4. Allemagne. — Il y a, dans le *Hanovre*, une zone pétrolifère qui offre un certain intérêt industriel, la zone de l'Aller (affluent de la Weser). Le centre principal, *Wietze*, produit 50 à 60.000 tonnes par an. Les terrains de la région comprennent les couches du Keuper au Crétacé, recouvertes en discordance par du Miocène horizontal ; des accidents mécaniques ont amené le pétrole jusqu'au jour et des niveaux adventifs se sont constitués, à la rencontre des cassures, dans les diverses strates sableuses jusque dans le diluvium. L'huile vient du fond et l'on est en droit de songer à une relation possible avec les gîtes salifères intercalés, soit dans le Keuper, soit dans le Zechstein qui possède d'ailleurs un niveau de schistes bitumineux. Pression faible (nécessité d'un pompage). L'huile diminue de densité au fur et à mesure qu'on s'approfondit. En 1931, cette région s'est notablement développée.

III. — Pétroles des zones de plissements tertiaires

1. Etats-Unis. — Les gisements pétrolifères, en rapport avec les derniers mouvements orogéniques qui ont débuté à la fin du secondaire, se trouvent dans les terrains plissés et faillés du Crétacé et surtout de l'Eocène.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Wyoming. — Les hydrocarbures y sont en relation avec les formations lagunaires du Danien (Groupe de Laramie : schistes, grès avec de nombreux lits de charbon).

Utah. — De nombreux indices hydrocarburés existent sur la rive du Grand Lac salé (bitumes, asphaltes). Comme sur la mer Morte, des sources amènent du bitume qui forme des îles flottantes. En faisant des sondages et en y injectant de la vapeur d'eau (procédé employé en Louisiane pour le soufre), on a remonté du bitume liquéfié. Les gisements sont probablement d'âge crétacé.

Texas. — La région du Texas, après avoir pris un grand essor (1905) suivi d'ailleurs d'une rapide décadence, est devenue le plus gros producteur du pétrole américain, grâce à la découverte d'un nouveau gisement. Les terrains forment une série non plissée, à pente très régulière et assez faible vers la mer ; mais ils sont recoupés par tout un système de failles postéocènes en rapport avec de fréquents pointements basaltiques et avec des venues de minerais sulfurés. Ce sont ces failles qui font réapparaître, parallèllement à la côte, une bande de couches relativement anciennes (Eccène inférieur et Crétacé) qui présentent des pentes parfois assez fortes, pouvant atteindre 30°. Ces couches sont doublement importantes : elles contiennent les réservoirs souterrains du pétrole et offrent des masses considérables de sel et de gypse, dont la réduction a donné naissance à l'un des plus grands gisements de soufre natif du globe. En partant de la surface, on trouve une épaisseur variable de terrains récents (argiles, sables et graviers), d'ordinaire aquifères, à la base desquels vient un banc caractéristique de calcaire poreux dolomitisé, souvent riche en pétrole dans les parties caverneuses (comme au Kansas) ; puis, sous la dolomie, se place le banc épais de gypse avec soufre natif. Ce sont des émanations de gaz naturels qui ont donné l'idée de faire un premier sondage en 1901 : on obtint un pétrole lourd, à la température de 27°, jaillissant à 50 mètres de haut et produisant par jour 70.000 barils ; l'exploitation s'intensifia et, dès 1905, on avait extrait 35 millions de barils, lorsque l'eau salée envahit les puits et refoula l'huile en profondeur ; le même fait se renouvela dans toutes les régions du Texas. Dans certains endroits, le pétrole imprègne les sables des couches superficielles.

Californie. — Les gisements s'alignent sur 500 kilomètres de long dans la dépression comprise entre la Coast-Range et la Sierra-Névada où coulent le San Joaquim et le Sacramento. Le pétrole, très dense, a été longtemps dédaigné. C'est, à l'heure actuelle, un des districts les plus importants du monde. Les niveaux se présentent dans des conditions très diverses, dans toute la série tertiaire, tantôt avec un fort plongement, tantôt presque horizontaux, tantôt plissés ; ils sont généralement dans des sables alternant avec des schistes.

2. Mexique. — Les gîtes ont été trouvés peu de temps avant la guerre ; ils ont pris un essor formidable de 1917 à 1924 et, depuis, ils ont subi un fléchissement tenant à des causes géologiques et politiques. On peut les compter parmi les plus extraordinaires du globe ; mais ils s'épuisent vite. On a exploré tout le district en bordure du golfe du Mexique, dans le prolongement du Texas.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

3. Amérique du Sud. — De la partie septentrionale, divergent deux chaînes tertiaires qui ont englobé la plate-forme brésilienne. La chaîne du Nord, de direction presque ouest-est, est la plus riche en pétrole : c'est là qu'on rencontre les champs de la *Trinidad*, connue depuis longtemps pour ses exploitations de bitume, de la *Colombie* et du *Venezuela* où les niveaux sont situés dans le Crétacé et le Tertiaire. La Chaîne des Andes, à l'ouest du massif brésilien, de direction presque nord-sud, est moins favorable à la localisation de gîtes pétrolifères, parce qu'elle est trop plissée. On ne trouve pas de pétrole dans la Cordillère des Andes proprement dite ; il y en a un peu dans la Chaîne côtière, Coast-Range (*Pérou*, *Chili*), ainsi qu'au pied du versant oriental de la Grande Cordillère où un sondage l'a fait découvrir fortuitement dans la *République Argentine*.

4. France. — On a fait des recherches en *Auvergne*, dans la Limagne, où il existe un grand développement d'asphalte. Aux environs de Riom, un sondage de 1.800 mètres a donné effectivement un peu de pétrole, mais sans résultat pratique. La région n'est pas très favorable à l'accumulation de l'huile ; les terrains oligocènes sont surtout formés par des alternances de marnes fines et de lits sableux peu développés ; de plus, la nature lagunaire de ces dépôts est douteuse, signalée seulement par un peu de gypse, à la base de l'Oligocène.

En *Alsace*, à *Péchelbronn*, on connaît depuis longtemps l'existence d'asphaltes et de sables bitumineux. Des sondages faits depuis 1870 ont montré l'existence du pétrole dans les sables sannoisiens et donné naissance à une industrie importante. Le bassin tertiaire pétrolifère forme une fosse parallèle à la vallée du Rhin qu'une faille limite à l'Ouest. Au delà de cette faille, on a retrouvé un peu de pétrole en 1891. Les imprégnations sont en rapport avec des bancs sableux inclinés à allure lenticulaire.

5. Carpathes. — Les Carpathes constituent la principale chaîne pétrolifère en Europe. De nombreux centres s'y succèdent sur le flanc externe dilaté (fig. 49), jusqu'à la région A de plateaux comprimés entre deux chaînes ; mais en réalité, d'un point de vue industriel, le nombre des points fructueux est très restreint ; il se réduit au groupe de Boryslaw-Tustanowice en Galicie et à celui de la Prahova en Roumanie.

La *Galicie* est très fortement plissée et disloquée ; les terrains les plus divers s'y trouvent en contact anormal ; la stratigraphie y est très difficile. On rencontre du pétrole depuis le Pliocène jusque dans le Crétacé ; d'où l'on a tiré cette conclusion probablement inexacte que l'origine du pétrole se trouvait dans les terrains inférieurs au Crétacé. Quand on trouve du pétrole dans le Crétacé, c'est sans doute que, par suite de renversements, le Crétacé a été amené en juxtaposition anormale avec des terrains pétrolifères plus récents. En réalité, le pétrole paraît être en relation avec le *Schlier* et les *argiles salifères* (Miocène, Burdigalien). Cependant, au-dessous, il en existe encore dans le *Tongrien* (grès de Majura et Kliwa), dans les *grès carpathiques*, éocènes et crétacés (grès de Schodnitza, grès calcaires à Fucoïdes, *Flysch*). Aussi les Carpathes sont-ils une des régions

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

pour lesquelles on a essayé encore récemment de soutenir la théorie éruptive. Cependant il y a là un rapport étroit entre le pétrole et le sel.

Le pétrole a été rencontré d'abord en Galicie tout à fait superficiellement et les premiers sondages profonds ne remontent guère qu'à 1884.

On connaissait à *Boryslaw* des filons très irréguliers d'Ozokérite dans le grès (seul gisement important de cette substance dans le monde) ; on y fit des sondages jusqu'à 650 mètres et on trouva du pétrole, montant à peu près jusqu'à la surface. Ce niveau est actuellement épuisé ; mais de nouveaux sondages, plus profonds, à 900, 1.200 mètres et plus, ont atteint d'autres zones pétrolifères de plus en plus riches, de sorte que la

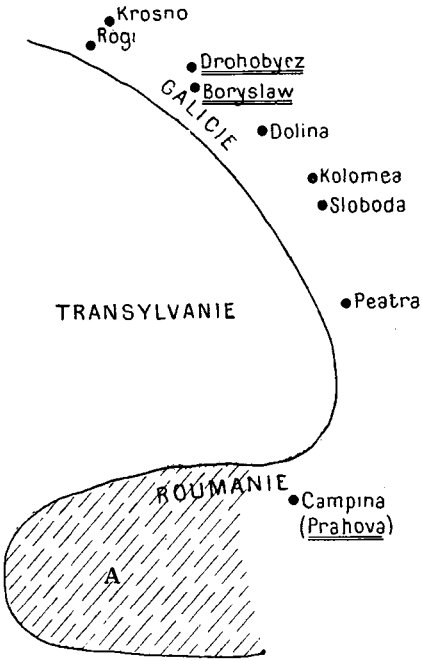


Fig. 49. — Carte schématique des gîtes pétrolifères des Carpathes.

production a augmenté jusqu'en 1910. Les grands centres industriels ont été Sanok, Krosno, Boryslaw, Tustanowice, Schodnitza, Koloméa (le plus important district de 1885 à 1890).

En *Roumanie*, on a trouvé à l'intérieur de la chaîne, en *Transylvanie*, des dégagements de gaz assez abondants pour qu'on ait fait le projet de s'en servir pour alimenter Pest. Sur le flanc externe, les sondages dépassent rarement 400 mètres, quoiqu'on soit descendu exceptionnellement à 600 mètres. Le grand district est celui de Campina-Boustenari, sur la *Prahova* qui avait été détruit pendant la guerre de 1914 et qui s'est brillamment reconstitué. On a là un anticlinal de Pontien venant buter au nord contre l'Helvétien salifère et improductif. Les sondages,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

d'abord localisés sur le flanc Nord, portent également aujourd'hui sur le flanc Sud.

6 Italie. — Les gisements italiens, fort peu importants, sont situés dans l'*Emilie*, sur le versant Nord des Apennins, entre Modène et Plaisance; les sondages ont, pour la plupart, trouvé de l'eau salée, mais peu de pétrole. Cependant sur la rivière du Taro, à Lévignano, ils ont fourni des résultats assez importants. Ces gîtes sont intéressants parce qu'ils sont en relation avec la formation gypso-saline pontienne, sur le prolongement de laquelle on trouve le soufre de Sicile et les volcans de boue avec dégagement d'hydrocarbures. En réalité, les niveaux pétrolifères occupent les couches poreuses (grès) intercalées entre deux couches argileuses, depuis l'Eocène jusqu'au Pliocène. Un certain nombre de gisements sont accompagnés d'asphalte. Production : 8 à 10.000 tonnes par an.

7. Caucase. — Depuis longtemps, on connaissait le pétrole à l'extrémité orientale de la chaîne (Région de Bakou) : il y avait un temple du feu à Surakhany ; on se servit d'abord de ce pétrole comme huile de graissage ; mais la région, la première exploitée, ne fût réellement mise en valeur qu'entre 1870 et 1880. On a découvert ensuite un autre gisement à l'extrémité occidentale (région de Batoum) ; il s'agit là également d'un point bas de la chaîne (la même coïncidence se reproduit en bien des points du globe). On n'a pas obtenu les résultats attendus. Puis au N.W. de Batoum, on mit en valeur le centre de Maikop vers 1910, sans recueillir les résultats escomptés. Enfin, au nord du Caucase, on a trouvé la région de Grosny.

Partout le pétrole est en rapport avec du Tertiaire assez récent, formé surtout par des dépôts littoraux de sables mélangés d'argile.

A *Bakou* (fig. 51) les gisements se trouvent dans la presqu'île d'Apchéron formant, au milieu de la Caspienne, une sorte de dôme anticlinal constitué par des terrains éocènes, miocènes, très irréguliers, argilo-sableux, recouvert par les couches calcaires de la formation aralo-caspienne. Ces calcaires sont stériles ; par contre tous, les terrains sous-jacents peuvent être productifs. Les niveaux principaux sont dans l'Oligocène. Au voisinage du pétrole, existent de nombreux dépôts de sel et des sources salées.

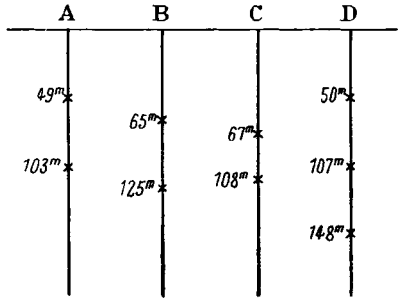


Fig. 50. — Coupes comparées de plusieurs sondages voisins à Bakou.

Dans le détail, l'allure de la formation tertiaire est très complexe ; aussi, en des points voisins, a-t-on obtenu des résultats très différents ; des puits ABCD, très voisins les uns des autres, fournissent du pétrole à des altitudes extrêmement variables (fig. 50).

Il y quatre districts principaux : *Sabountchy*, *Balakhany*, *Romany*, *Bibi-Eibat*. Ce qui est particulièrement frappant, c'est la manière nette dont les gisements s'épuisent avec le temps. Ainsi un puits foré a donné le

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

13 août un jaillissement à 50 mètres de hauteur, qui s'est arrêté à 9 heures du soir et a recommencé le 14 août à 5 heures du matin, montant à 40 mètres, fournissant 5.000 tonnes par jour et causant des dégats considérables. On ne put le capter qu'au bout de six semaines ; il fournit alors 3.200 tonnes par jour ; puis, après 3 semaines de ce régime, il baissa et s'épuisa.

On constate que le nombre des puits augmente chaque année, tandis que la moyenne de la production de chaque puits diminue progressivement.

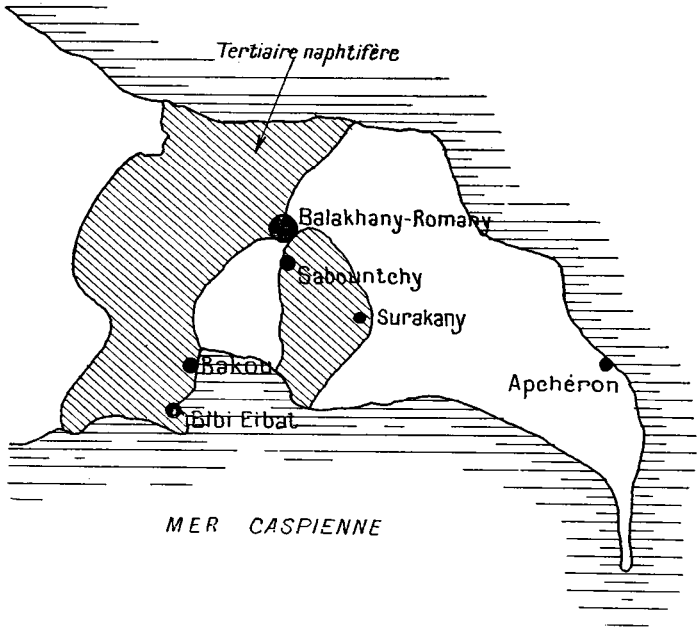


Fig. 51.= Carte de la région de Bakou.

La production moyenne d'un puits au cours de la première année d'exploitation a aussi considérablement baissé de 1895 à 1910. La profondeur des puits augmente en même temps très vite parce que les niveaux supérieurs s'épuisent. Enfin la proportion des sondages productifs par rapport aux sondages stériles diminue graduellement. On doit s'approfondir en moyenne de 6 mètres pour retrouver une production nouvelle de 10 milions de tonnes ; à cette vitesse on serait à une profondeur de 700 mètres vers 1950. En 1929, le district de Bakou a encore fourni les 4/10 de la production russe.

Les gisements de Bakou se prolongent vers l'est dans la Caspienne (île de Tchéléken) et au delà (Turkestan russe Ferghana). Ils se poursuivent vers l'Ouest dans la direction de Grosny.

A *Grosny*, quelques puits ont donné 8 à 10.000 tonnes par puits et par jour. En 1910, la production du district avait dépassé 1.000.000 tonnes. Avec le district de *Maïkop*, le district de Grosny a fourni en 1929, 35 %

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

de la production russe. La moyenne annuelle de la production de chaque puits est plus forte qu'à Bakou. Les gisements sont accompagnés de dépôts sulfureux et de sources sulfurées chaudes.

Dans la région de *Taman* et dans la presqu'île de *Kertch*, de nombreux suintements avec volcans de boue n'ont pas permis d'obtenir les résultats qu'on en attendait.

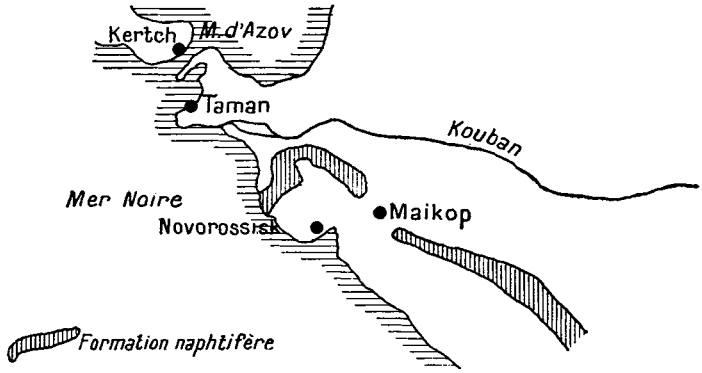


Fig. 52. — Carte de la région de Maïkop.

8. Chaînes tertiaires asiatiques. — Au sud du Caucase, les chaînes tertiaires forment deux cordillères qui bifurquent, englobant la Perse. C'est la Cordillère méridionale qui est la plus riche : sa bordure sud porte les gisements de *Mésopotamie* et du *Golfe Persique* connus depuis fort longtemps. L'amirauté anglaise y a acheté de petites sociétés, un peu avant la guerre, et obtenu de brillants résultats (Anglo-Persian and C°). La région de Mossoul, très disputée, donne aussi de bons résultats.

Dans les Indes anglaises, nous ne trouvons pas de pétrole dans la haute chaîne : au pied de l'Himalaya, l'existence de la fosse des Siwalicks est peu favorable aux localisations pétrolifères.

Par contre, en *Birmanie*, on rencontre deux zones pétrolifères, fournissant plus de 1.000.000 tonnes par an, de part et d'autre des monts Arakan : l'*Assam* et la vallée de l'*Iraouaddy*. Dans l'Assam, le pétrole est associé avec des sources salées et des jets de gaz naturels sur un anticlinal de Tertiaire supérieur ; la zone se poursuit par les îles Arakan. Dans la vallée de l'Iraouaddy, la zone pétrolifère s'étend sur près de 1.000 km. de long ; mais elle n'est fructueusement exploitable que sur une cinquantaine (Centres de Yenang-Young et de Yenang-Yat) ; la vallée occupe l'emplacement d'un ancien synclinal miocène et les gisements semblent occuper des points bas, sur des lignes de moindre résistance.

Dans les *Iles de la Sonde*, surtout à *Sumatra* et à *Java*, se développe une bande pétrolifère, très longue, sur plus de 1.000 Kilomètres. Les premières recherches furent longtemps infructueuses : l'essor date de 1901 environ (Royal Dutch). Il y a ici un rapprochement accidentel entre le pétrole et les phénomènes volcaniques. Les principaux centres sont à Sumatra (région

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Sud-Est : Palembang), au milieu de terrains tertiaires (Eocène, Oligocène, Miocène) faiblement plissés avec des intrusions de gabbros ; les niveaux importants sont dans le Pliocène ; on en connaît aussi dans le Miocène. Les puits les plus productifs se trouvent sur des zones anticlinales. A Java les résultats n'ont pas été aussi considérables.

A *Bornéo*, les gisements sont dans la bordure tertiaire, autour du horst ancien. Il s'agit d'un pétrole lourd qui a donné peu de résultats.

Aux *îles Philippines*, le pétrole est un peu exploité dans l'île de *Mindanao*. Les conditions y paraissent favorables.

Enfin, au *Japon*, des gîtes assez importants se trouvent tout le long de la côte Ouest, en relation avec les plissements tertiaires. Les niveaux occupent des bancs de grès bruns du Tertiaire supérieur, accessoirement des couches de schistes et de tufs (Province d'*Echigo*). La même zone pétrolifère se poursuit plus au Nord dans l'Ile de *Sakhaline*.

D. — OZOKÉRITE

L'*ozokérite* (Paraffine naturelle ou Erdwachs) est une sorte de pétrole solide, vert jaunâtre ou brun, flexible, malléable, à odeur aromatique ;



Fig. 53. — Coupe schématique du gisement d'ozokérite.

elle contient 32 à 50 % de paraffine ; on constate que ce pourcentage diminue en profondeur et que l'ozokérite y est remplacée par du pétrole qui est



Fig. 54. — Coupe d'une galerie dans la mine d'ozokérite de Boryslaw,

la substance originelle. On fond l'ozokérite par un courant de vapeur, puis on la distille et on la blanchit.

L'ozokérite a toutes les applications de la cire (ruches, artificielles, enduits, cierges, isolants électriques, etc.) On en extrait de la paraffine qui sert elle-même à la fabrication des cierges, vernis, etc.

Le seul gisement industriel est celui de *Boryslaw (Galicie)* ; quelques

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

autres points de Galicie n'ont qu'un intérêt secondaire. L'ozokérite forme là une poche (fig. 53), sorte de remplissage de faille dans un synclinal rompu.

En coupe, on trouve une série de fractures (fig. 54). L'ozokérite forme des sortes de filons suivant ces fissures et suivant les plans de joints des schistes et des grès.

On connaît d'autres gisements dans l'*Utah* et dans une île de la *mer Caspienne.*

E. — BITUMES

1. Composition. Usages. — Les *bitumes* ont une composition complexe. On les a longtemps considérés comme des mélanges de deux substances, le pétrolène C_{40} H_{22} liquide et l'oxyde de pétrolène ou asphaltène solide (Théorie de Boussingault). Cette conception n'est pas exacte, mais elle donne une représentation simple et en quelque sorte schématique des faits réels. Il y a, dans le bitume, un groupe d'éléments liquides, susceptibles de s'oxyder et de devenir solides. Les bitumes sont donc des hydrocarbures légèrement oxygénés. En outre ils peuvent contenir du soufre ou en être exempts ; le soufre paraît dû à la réduction de sulfate de calcium qui se trouvait dans le gisement.

Les bitumes de bonne qualité servent à la fabrication des vernis, des laques, des peintures au bitume (elles noircissent et se craquèlent) et valaient avant la guerre jusqu'à 1.000 francs la tonne. Ils ont été utilisés au début en photographie : dissous dans un vernis, ils jouissent d'une sensibilité particulière à la lumière. Les bitumes ordinaires contribuent à la fabrication des asphaltes ; on en ajoute 7 à 10 % (surtout du bitume de la Trinidad) aux calcaires asphaltiques ; ils sont utilisés aussi au goudronnage des routes, dans l'industrie du caoutchouc, du gaz d'éclairage, etc.

2. Mode de gisement. — Le bitume se trouve généralement dans des points où le pétrole existe en profondeur ; mais la connexion n'a pas été partout constatée.

Gisements de Judée. — On sait que du bitume vient parfois flotter à la surface de la *mer Morte,* surtout après des secousses sismiques ; le fait est très accidentel. Le bitume est recueilli par les Arabes et vendu à un prix élevé. Ces bitumes sont probablement en relation avec les gîtes hydrocarburés du littoral de la Mer Morte au milieu de calcaires crétacés (asphalte) ; ils arrivent du fond du lac, fournis, soit par un remaniement hydrothermal des gîtes crétacés, soit par des suintements de pétrole.

La Trinidad. Cette île a le monopole à peu près absolu de la production du bitume mondial : de plus, elle est devenue récemment un centre pétrolifère. Le gisement se trouve au Lac de la *Braie,* dépression sans eau entièrement remplie de bitume. Celui-ci monte par l'effet de la pression à mesure qu'on y creuse des vides et se renouvelle au fur et à mesure ; on a pu ainsi avoir l'impression erronée de réserves infinies de bitume venant de la profondeur. On exploite 100.000 à 120.000 tonnes de bitume par an ; tantôt on

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

l'exporte directement, tantôt on l'épure sur place pour le débarrasser de l'eau qu'il contient (30 %).

Toute la cordillère, dont fait partie la Trinidad, contient d'ailleurs du bitume et du pétrole (Venezuela, Cuba) et se raccorde aux gisements de la côte des Etats-Unis (Texas, Louisiane).

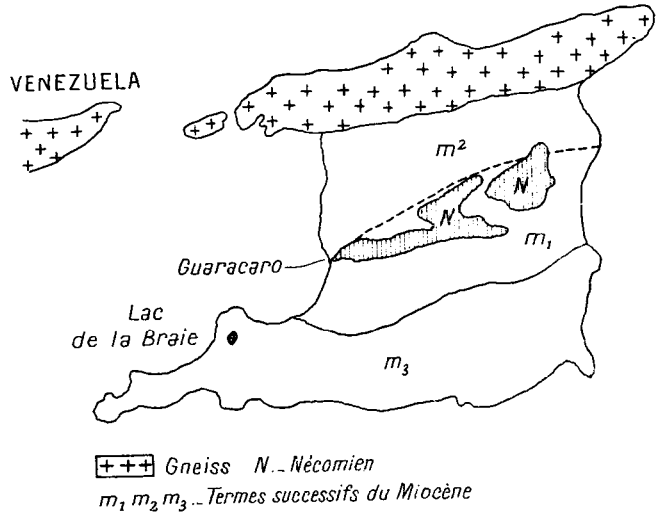


Fig. 55. — Carte géologique schématique de la Trinidad.

Gisements divers. — On connaît des gisements bitunineux sur toute la côte Adriatique (*Zante*, *Céphalonie* et surtout *Sélénitza* en Albanie). A Sélénitza, le bitume forme des poches dans des grès et conglomérats pliocènes; il contitue souvent des sortes de couches interstratifiées ayant jusqu'à 3 mètres d'épaisseur; il n'est probablement pas contemporain de la sédimentation ; mais c'est le produit d'une accumulation en des points priviligiés, peut-être dans les points les plus fossilifères.

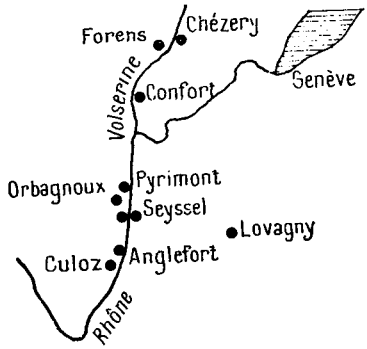


Fig. 56. — Schéma de la région de Seyssel.

La présence du bitume est connue dans la région de l'*Ain*, dans la vallée de la Valserine, à Forens, à Chézery, (asphaltes dans l'Urgonien) ; sur le Credo entre Chézery et Confort (mollasse avec bitumes) ; à Orbagnoux (Hydrocarbures dans le Kiméridgien) ; à Seyssel (calcaires asphaltiques dans l'Urgonien). Tous ces gîtes se relient à ceux du *Val Travers*, plus au Nord, en Suisse, et à ceux de la région d'*Annecy*. Le fait que tous les étages sont imprégnés d'hydrocarbures peut indiquer que l'origine de ceux-ci est plus profonde.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

F. — ASPHALTES

1. Propriétés et usages. — Ce sont des *calcaires imprégnés de bitume.* Celui-ci est si intimement incorporé au calcaire qu'il ne peut en être séparé, tandis que, dans les sables, un simple lavage à l'eau chaude permet de l'isoler. Au microscope on constate l'existence d'une série de petits grains calcaires, recouverts d'une pellicule de bitume. Quand on chauffe, ces pellicules se ramollissent vers 80° ; le calcaire tombe en poussière et on peut lui donner alors une forme quelconque (briques, etc.) qu'il conserve en se refroidissant.

Les asphaltes servent surtout pour la *confection des chaussées et des trottoirs.* Les calcaires asphaltiques résistent mieux à l'usure que les autres calcaires.

Pour la confection des chaussées, on prend un calcaire asphaltique régulièrement imprégné ; on le broie, on le tamise pour en faire une *poudre d'asphalte* ; celle-ci est chauffée à 120°, étendue sur la chaussée et pilonnée. Son inconvénient est de se fissurer (par ces fissures l'eau pénètre et gèle), et d'être glissant.

Pour la confection des trottoirs, on prend le même calcaire en poudre ; on le chauffe avec du bitume de la Trinidad, ou avec du bitume d'Autun ou de l'Allier, à raison de 300 kilogrammes de bitume pour 3.500 kilogrammes d'asphalte, jusqu'à ce que le mélange pâteux puisse couler en pains. Au moment de l'utiliser, on fait fondre ce *mastic asphaltique* dans des chaudières en plein vent, on y ajoute encore 9 % de bitume et jusqu'à 60 % de sable ; on étend le tout, à l'état de fusion, sur un fond de béton.

Quand l'asphalte est de qualité inférieure, on en fait des *pavés comprimés* dont on se sert comme de pavés de bois ; cette application s'est peu répandue.

2 Principaux gisements. — Les meilleurs calcaires asphaltiques sont des calcaires franchement marins, suffisamment *poreux* ; là où le calcaire est argileux ou concrétionné, il n'y a pas pénétration de bitume.

Gîte de Seyssel ou de Pyrimont (Ain). Situé le long du Rhône, c'est le plus important de France (1). Le calcaire *urgonien* y est imprégné de bitume à sa partie supérieure ; les niveaux imprégnés forment comme une série de marches d'escalier. Au toit, on rencontre la mollasse d'eau douce aquitanienne contenant encore un niveau de sables bitumineux non exploités. Dans ces calcaires urgoniens, les fossiles (Caprotines, etc.) sont souvent remplis de bitume, mais ce remplissage est certainement postérieur à la fossilisation. On a émis récemment sans preuves décisives l'opinion que l'imprégnation bitumineuse de Seyssel viendrait *per descensum* des couches oligocènes superposées. L'asphalte de Seyssel est très homogène et peut être employé tel quel : cependant il s'y trouve des rognons

(1) Au total, la production des asphaltes français s est élevée en 1929 à 63.700 tonnes contre 41.100 en 1913.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

argileux ou siliceux qui ont échappé à l'imprégnation et parfois le bitume forme de véritables poches dont il s'échappe par des fissures.

Gîte de Pont-du-Château. — Il y a, dans toute la région comprise entre Clermont-Ferrand, Riom et l'Allier, des imprégnations bitumineuses, localisées au voisinage des basaltes les plus récents, soit dans des calcaires Chattiens à *Hélix Ramondi*, soit dans les marnes tongriennes, soit dans les sables et arkoses sannoisiennes, soit dans des pépérites basaltiques. Tous ces terrains sont plus ou moins imprégnés. On trouve par exemple, dans les arkoses et les pépérites, des suintements hydrocarburés sans grande valeur.

A *Pont-du-Château* (Puy-de-Dôme), l'imprégnation est localisée dans un banc de calcaire à *Hélix Ramondi*, épais de 4 à 6 mètres et intercalé entre deux bancs de calcaires marneux. L'exploitation a lieu souterrainnement. La montée du bitume semble être en relation avec deux fractures, bien visibles dans la mine et par lesquelles coule du bitume en quantités assez abondantes.

Il y a, dans le calcaire, des veines, remplies de bitume, en apparence très riches. En fait, ce bitume qui suinte n'est pas intimement incorporé au calcaire qui est beaucoup moins régulièrement imprégné qu'à Seyssel. Cet asphalte doit être broyé et mélangé avec d'autres bitumes pour obtenir un produit homogène.

Gîte du Gard. — Dans le Gard, à l'Est du grand massif primaire où se trouvent les bassins houillers de la Grand'Combe et de Bessèges, s'allonge une grande fosse d'effondrement, bordée par des failles, longue de 60 kilomètres et large de 10, parallèle au bord des Cévennes. Cette fosse est remplie de terrains tertiaires, nummulitiques, généralement lacustres, parmi lesquels on rencontre des lignites et des calcaires asphaltiques Ceux-ci sont exploités en plusieurs points, notamment à *Saint-Jean-de-Marvéjols.* La couche imprégnée, épaisse de 15 mètres, est découpée par quelques failles et inclinée de 15 à 20° vers l'ouest.

Gisements étrangers. — Il existe des gisements très importants dans le Jura suisse, en particulier dans le *Val Travers* (canton de Neufch âtel) ; comme à Seyssel, les calcaires imprégnés sont situés dans le *Barrémien à faciès urgonien.*

D'autres gisements se trouvent en *Sicile* (près de Syracuse), en *Russie* (sur les rives de la Volga, près de Samara), dans le *Tyrol*, en *Amérique du Nord* (Utah).

G. — GAZ NATURELS

Les dégagements de carbures d'hydrogène combustibles sont très fréquents : gaz des *marais*, grisou des *mines de houille*, gaz des *mines de sel.* Dans certaines localités spéciales, des carbures d'hydrogène se dégagent en grande abondance à travers une boue imprégnée de sels marins en produisant des volcans de boue ou *salses* (Apennins, Sicile, Caucase, Perse, Birmanie, etc.).

Tous ces faits sont connus depuis fort longtemps et on a toujours eu l'idée de tirer parti de ces émanations gazeuses en les brûlant : en Chine, on rapporte que les gaz naturels ont été utilisés depuis des siècles dans le *Se-Tchouan.*

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Mais la véritable application industrielle des gaz hydrocarburés date de 1821. On les employa à cette époque pour éclairer une ville de l'*Etat de New-York*. En 1830, on les utilisa dans l'éclairage d'un phare sur le lac *Erié*. En 1841, on en chauffa des chaudières (*Virginie occidentale*). Après 1874, on s'en servit pour le chauffage d'usines entières en *Pennsylvanie* (usine à fer, verreries, ville de Pittsbourg).

C'est en 1884 qu'eut lieu la découverte du champ de gaz de Findlay (*Ohio*), où un forage donna des projections gazeuses formidables (336.000 m³ en 24 heures). Ce fut une ère de prospérité. On capta les gaz des sondages voisins pour la ville de Pittsbourg. Dans le district de cette ville, on brûla par jour le gaz équivalant à 20.000 tonnes de charbon (30.000.000 m³) ; il y eut un moment d'enthousiasme. Mais ces exploitations de gaz combustibles sont toujours très précaires et, dès 1888, la production en Pennsylvanie commença à baisser jusqu'en 1896. On dut retrouver de nouveaux champs. Actuellement, il se produit un nouvel essor des gaz combustibles au Texas et l'on a construit un pipeline de 1.600 kilomètres pour amener ces gaz à Chicago.

Dans l'ensemble des Etats-Unis la production totale des gaz était évaluée en 1909 à 16 milliards de m³ représentant 315.000.000 francs. En 1930, elle dépasse 400 milliards de m³.

L'existence de tous ces gaz combustibles est liée à celle des pétroles. Les gaz contribuent souvent au jaillissement des pétroles par des fractures naturelles ou des trous de sondages. Leur dégagement est, par suite, un des indices dans la recherche du pétrole.

Souvent ils se trouvent au-dessus du pétrole et se dégagent avant lui. Quelquefois ils sont au-dessous et se dégagent après. Il n'y a aucune règle fixe à cet égard. Les calcaires crevassés comme ceux de l'Ohio semblent être favorables à leur accumulation.

Les gaz sont captés sur les forages, puis amenés par des conduites analogues à celles qui servent au gaz d'éclairage, mais éprouvées à des pressions de 80 à 100 atmosphères.

On connaît aussi des gaz naturels au *Canada* (Ontario), en *Transylvanie* où une exploitation a été organisée en 1910 et en *Russie* (Grosny et Surakhany dans le Caucase). En *France*, la concession de *Buisin* (Ain) exploite depuis la guerre un sondage dont les gaz sont utilisés pour l'éclairage et le chauffage de la ville d'Ambérieu. Ce sondage, qui manifeste des signes d'épuisement, a fourni, en 1929, 327.000 m³ de gaz.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE V

BORE

1. Usages. — Le *bore* se rencontre dans la nature sous forme d'acide borique et de borates. L'*acide borique* est utilisé en pharmacie comme antiseptique ; on l'emploie aussi dans la fabrication des bougies. Le composé du bore qui a reçu le plus d'application est le *borax* (borate de soude). Il est utilisé, grâce à sa propriété de dissoudre les oxydes, dans la soudure des métaux, pour le décapage ; on s'en sert dans la céramique pour donner à la couverte le même coefficient de dilatation qu'à la pâte ; il rend incombustibles les cotons, les revêtements des coffres-forts.

2. Statistique. — La production en 1840 était d'environ 1.000 tonnes provenant exclusivement de *Toscane* où une compagnie anglaise en détenait le monopole ; en 1854 elle était de 2.000 tonnes. Pendant longtemps, le borax valut 2.300 francs la tonne rendue à Liverpool ; puis on découvrit vers 1865 les gisements de *Californie* qu'on mit en exploitation de 1870 à 1875 et qui abaissèrent beaucoup les prix (jusqu'à 1.000 francs la tonne). La mise en valeur des gisements d'*Asie Mineure*, au Sud de la mer de Marmara, à Sultan-Tchair, jeta 10 à 15.000 tonnes sur le marché et provoqua une nouvelle baisse. On découvrit enfin les gîtes de borax du *Chili*, du *Thibet* et de l'*Inde orientale*, ce qui accentua encore plus la baisse (entre 300 et 400 francs la tonne avant la guerre). En mars 1932, le borax vaut 1.900 francs-réduits la tonne.

D'ailleurs les usages du bore se sont développés et la production s'est régularisée ; elle est d'environ 155.000 tonnes de minéraux boratés (1928), dont 120.000 des Etats-Unis (Californie), 16.000 du Chili (contre 40.000 en 1925) et 15.000 d'Asie Mineure. La Toscane produit de 4 à 5.000 tonnes. L'Inde et Stassfurt n'ont qu'une faible production.

3. Gisements. — Le bore joue un rôle important dans les fumerolles des granites ; aussi se trouve-t-il en inclusions dans certaines roches cristallines acides, avec les minéraux du groupe de l'étain : tourmaline, axinite, topaze.

Les gisements pratiques se rattachent à trois types:

1° Soffioni (Toscane).

2° Gîtes sédimentaires d'évaporation (Asie Mineure).

3° Gîtes actuels d'évaporation désertique (Californie).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

I. SOFFIONI DE TOSCANE. — Ces gisements se rencontrent aux environs de Volterra. Ils sont localisés sur plusieurs lignes de dislocations orientées Nord-Sud, par lesquelles se dégage de la vapeur d'eau chargée de sulfates et d'un peu d'acide borique (1 à 2 %), avec H^2S, CO^2 et des traces d'hydrogène libre. Ces dégagements se réduisent quelquefois à de simples sources chaudes. Mais l'eau peut être sous pression à une température de 100 à 175° et, lorsqu'elle trouve une issue vers la surface, elle se vaporise brusquement.

Actuellement les jets naturels sont épuisés ou sans importance. On en provoque par des sondages allant jusqu'à 120 mètres.

Les sources obtenues sont de deux catégories. Il y a des 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 ; il y a aussi des soffioni qui donnent, avec la vapeur et le gaz, de l'eau tenant de l'acide borique en dissolution. On fait barboter les gaz dans des bassins, on concentre, on évapore et on raffine. Les produits sont : l'acide borique, le borate de soude et le sulfate d'ammoniaque.

Cette exploitation, simple en apparence, comporte cependant bien des difficultés et des dépenses : son importance, après s'être restreinte d'année en année, est devenue très secondaire. Les soffioni durent peu de temps.

L'origine géologique de ce bore est assez mystérieuse. Les soffioni de Toscane sont situés sur la formation gypsosaline qui longe les Apennins (gypse et albâtre à Volterra). Une première théorie attribue l'origine des gisements à une concentration de bore dans la formation gypsosaline. Mais on a fait également observer que le bore est en relation avec le volcanisme : c'est ainsi que les minéraux borifères (tourmaline) se rencontrent fréquemment dans les auréoles des massifs granulitiques. On en a conclu — et cette théorie a été soutenue par certains chimistes — à une origine fumerollienne des soffioni (décomposition du sulfure de bore). Il est impossible de décider à laquelle de ces théories s'arrêter, bien que la première paraisse beaucoup plus vraisemblable. En tout cas, comme on va le voir, les autres gisements de bore sont sédimentaires.

II. — GISEMENTS D'ÉVAPORATION SÉDIMENTAIRE. — A *Sultan-Tchair*, près de Panderma, au S.-W. de Brousse, se trouve une dépression miocène de 6 à 8 kilomètres de diamètre, encaissée dans des gabbros, granites, schistes et andésites. Le bassin est rempli de sédiments dont la partie supérieure au moins appartient au Tertiaire. Les couches miocènes sont accompagnées de couches de gypse avec anhydrite présentant des rognons de *pandermite* (borate de chaux hydraté, plus dense que celui du Chili) intercalés. L'exploitation s'effectue par puits et galeries. La production est montée à plus de 15.000 tonnes par an. De tout temps, les potiers du pays se sont servis de la pandermite.

Stassfurt. — Ces gisements se rapprochent des précédents ; ils sont d'âge permien et se trouvent à la partie supérieure du gîte, dans la zone de la carnallite ; ils fournissent annuellement quelques centaines de tonnes de *stassfurtite* (borate de Ca et chlorure de Mg), en boules pesant au maximum 10 kilogrammes. Elles sont rares, mais les primes promises aux ouvriers activent leur recherche.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

III. Gites d'évaporation désertique. — On rencontre encore les borates en Californie, dans la Sierra-Névada, au Mexique, au Chili, au Pérou, en Perse. Ils s'y trouvent dans des formations superficielles, formant des croûtes salines dans des bassins d'évaporation désertique où ils sont accompagnés de KCl, NaCl, SO^4NaH, CO^3Na^2, AzO^3K, AzO^3Na.

En *Californie*, l'eau du « Borax lake » contient une certaine proportion de sels alcalins et, en particulier, 7 grammes de borax par litre que l'on exploitait au début par évaporation dans des bassins. Aujourd'hui on opère par dragage des boues du fond, très riches en borax sur une épaisseur de 1 m. 50. Nous sommes là au voisinage de geysers et gisements de cinabre, par conséquent dans des conditions semblables à celles des soffoni de Toscane.

Le phénomène paraît assez général dans cette région désertique où on rencontre parfois des sources d'eaux riches en borates.

Au *Pérou* et au *Chili*, le bore existe aussi dans des croûtes salines, à l'état d'*ulexite* (borate double de soude et de chaux hydraté). Son origine première paraît être liée à la présence de roches volcaniques qui l'auraient fourni par dissolution et remis en mouvement.

En résumé le bore provient :

1° Des fumerolles ;

2° De l'évaporation de l'eau de mer dans des bassins de sédimentation.

Les borates se présentent sous deux formes :

1° Une matière blanche, d'apparence crayeuse, tachant les doigts (Californie) ;

2° Une matière soyeuse, fibreuse, semblable à de l'amiante, d'ordinaire en boules (Chili).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE VI

PHOSPHORE

Le phosphore, à l'état de phosphates, est devenu une des substances industrielles les plus importantes. La France en est à la fois l'un des plus grands consommateurs et l'un des plus grands producteurs.

1. Usages. — Les usages directs du *phosphore* sont assez considérables : fabrication des allumettes (ph. rouge), pharmacie, composition de certaines pâtes vénéneuses, production de bronzes phosphoreux. Le phosphore employé est extrait des os et surtout des phosphates minéraux.

Le *phosphate de chaux* est le principal minerai du phosphore. Il est utilisé pour faciliter la déphosphoration complète des fontes de fer peu phosphoreuses ; il sert dans la métallurgie du cuivre et dans celle du nickel, dans la fabrication de verres spéciaux. En outre la *turquoise* (phosphate d'alumine) est employée comme pierre d'ornement.

Mais la consommation la plus considérable du phosphore se fait sous forme de phosphate de chaux pour l'*agriculture*. Les plantes ont besoin d'un certain nombre d'aliments, en particulier d'azote, de potasse et de phosphore. Leurs cendres renferment de 5 % (dans les herbages) à 25 ou 30 % (céréales) d'acide phosphorique ; les graines en contiennent beaucoup.

Le phosphore se trouve un peu partout dans le sol que la culture tend à appauvrir, car une petite partie seulement du phosphore revient aux terrains (fumier) ; en effet, il passe aux animaux, puis à l'homme (squelette), de sorte que l'on a pu dire que le phosphate de chaux avait une tendance à se concentrer dans les sépultures. Elie de Beaumont a calculé que le phosphate ainsi accumulé en France depuis le commencement de l'ère chrétienne constituerait une couche de 2 mètres de puissance sur 1 kilomètre carré, ou de 0 mm. 004 sur toute l'étendue de la France. On peut également remarquer que les 1.600 millions d'hommes actuellement vivants contiennent 600.000 tonnes de phosphore.

D'autre part, une quantité assez considérable de phosphate est également perdue par suite de sa dissolution dans les eaux et va à la mer, où elle est d'ailleurs nécessaire pour la vie des organismes marins.

Pour éviter l'épuisement des sols en phosphore, on eut recours autrefois à des alternances de cultures de plantes à racines profondes et à racines superficielles, à des labours profonds, etc., qui reprenaient le phosphore du sol, puis à des engrais organiques ; actuellement on emploie des phosphates minéraux.

Heureusement la plupart des sols contiennent du phosphore emprunté aux roches (éruptives ou sédimentaires) du sous-sol. Nivoit, étudiant

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

les roches des Ardennes à ce sujet, a montré qu'ellles renferment toutes des quantités d'acide phosphorique allant de simples traces à 0,2 ou 0,3 % :

Diorite, Eurite	0,2 % à 0,3 %
Phyllades	0,1 %
Arkoses et Quartzites	traces (0,002 %).
Calcaire dévonien.....	traces (0,01 %).

Dans beaucoup de calcaires secondaires, on trouve jusqu'à 2 % de phosphate de chaux. Les roches éruptives et métamorphiques contiennent le phosphate à l'état d'*apatite*, qui n'est pas assimilable, mais qui, par suite des remaniements, est l'origine indirecte des phosphates sédimentaires. Ceux-ci proviennent d'ailleurs aussi d'une façon plus directe des organismes vivants ; la proportion de phosphore a des relations nettes avec celle des organismes.

En agriculture, la question essentielle est l'*assimilabilité du phosphore.* Il faut que les phosphates puissent être dissous par les acides faibles associés à la plante. *L'apatite* finit à la longue par se dissoudre ; mais, pratiquement, elle n'est pas assimilable. Les *phosphorites* simplement cristallines et concrétionnées, qui sont à l'apatite ce que la calcédoine est au quartz, sont un peu assimilables, mais ne sont pas utilisables sans avoir subi une préparation. Les *phosphates sédimentaires* sont plus solubles et assimilables dans des proportions diverses. Les *scories de déphosphoration* des minerais de fer phosphoreux (c'est-à-dire contenant 1 à 2 % de phosphore) sont également utilisées ; après avoir discuté leur emploi, il est actuellement admis qu'en poudre fine, elles sont complètement assimilables et très comparables aux superphosphates, Les minerais de fer sont ainsi devenus indirectement une source importante de phosphates.

Les phosphates naturels sont transformés en *superphosphates* assimilables, par un traitement à l'acide sulfurique ; c'est là une opération très fructueuse au point de vue industriel. Il est curieux de voir qu'une grande manufacture de glaces, comme Saint-Gobain, a été amenée à devenir fabricant de soude, puis d'acide sulfurique, puis extracteur de pyrite, puis fabricant de superphosphates, ces industries se liant les unes aux autres.

Les superphosphates ne doivent pas contenir plus de 5 % d'alumine et de fer ; quand cette proportion est dépassée, il se produit une *rétrogradation* du superphosphate ; une partie revient à l'état de phosphate insoluble. Il y a peut-être quelque exagération dans cette manière de voir ; car cette rétrogradation se produit de toutes façons au contact des produits à base de fer et d'alumine que contient le sol.

Actuellement on n'est pas aussi certain qu'autrefois de l'intérêt que présente la transformation des phosphates en superphosphates : on a soutenu qu'il y avait un préjugé dans cette pratique et que la pulvérisation suffisait.

Le *commerce* des phosphates naturels se fait à l'unité de phosphate tricalcique (tant %). Les superphosphates se vendent au kilogramme d'acide phosphorique soluble. Par définition, un phosphate à 70 % (700 kilogrammes de phosphate pur à la tonne) renferme 70 unités ; le prix de l'unité est donc celui de 700/70 ou 10 kilogrammes de phosphate. Dans les superphosphates on compte par unité d'acide phosphorique aux cent kilos. La teneur en phosphate est à peu près double de la teneur en acide

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

phosphorique. D'autre part, un phosphate à 70 % (ou 32 % d'acide phosphorique) donne, avec 90 kilogrammes de SO^4H^2, 175 kilogrammes de superphosphate titrant 18 % d'acide phosphorique.

2. Histoire de l'industrie phosphatière et Statistique. — C'est vers 1820-1830 qu'on eut l'idée de donner de l'acide phosphorique aux plantes sous forme de phosphates. Mais cette pratique resta assez restreinte jusqu'au jour où l'industrie des superphosphates fut créée en Angleterre (1852). En 1886, les scories de déphosphoration de Meurthe-et-Moselle furent introduites sur le marché.

a) Dans les débuts, on exploita les gisements phosphatés en rapport avec les transgressions jurassiques et surtout crétacées : *Boulonnais* (phosphates découverts dans le Gault en 1810), *Angleterre* (1822), *Ardennes et Meuse* (1855, nodules à 35 ou 40 %), *Drôme* (1868, sables à 35 à 40 % ; nodules à 50 ou 60 %), *Ain* (1868, nodules à 40 %), *Auxois* (1876, 60 %), etc.

b) Puis c'est en 1867 que furent découverts les phosphates de la *Caroline*, aujourd'hui presque épuisés (60 %).

c) En 1869, on découvrit les phosphorites du *Quercy* (jusqu'à 75 %).

d) De 1877 à 1886, on trouva les craies phosphatées à faible teneur (25-30 %) de la *Belgique* et du *Nord de la France*. On les exploita d'abord dans la région de Mons. Plus tard on reconnut, en relation avec ces craies, des poches d'enrichissement sableuses parfois très riches, comme les poches de sables phosphatés de Beauval à 75 %, en 1886.

e) En 1889, on découvrit les gisements très importants de la *Floride*, analogues à ceux de la Caroline (68 à 78 %) ; puis, en 1894, ceux du *Tennessee* (80 % ; Dévonien).

f) En 1893, on reconnut l'existence des craies phosphatées éocènes de l'*Algérie*, à Tébessa (55 à 60 %) ; puis, en 1899, de *Tunisie*, à Gafsa (58-63 %),

g) En 1900, ce fut le tour des gisements des îles du *Pacifique* (75 à 85 % à Makatea).

h) Enfin, récemment, on trouva des gîtes considérables de craies phosphatées au *Maroc* (1922-1923) (75 %).

A l'heure actuelle, la production mondiale atteint 10 millions de tonnes ; elle était en 1885 de 1.600.000 tonnes, en 1905 de 3.700.000 tonnes, en 1913 de 7.000.000 tonnes. Cette progression a été troublée par la guerre ; mais la production a repris sa marche ascendante depuis 1924 (7.750.000 en 1924 ; 10.350.000 tonnes en 1927 ; 10.500.000 tonnes en 1929 ; 11.800.00 tonnes en 1930). La production de 1929 se répartit ainsi :

Possessions françaises : 5.300.000 t.
- *Tunisie* : 2.510.000 tonnes (3.330.000 tonnes en 1930).
- *Maroc* : 1.600.000 tonnes. (1.780.000 tonnes en 1930).
- *Algérie* : 750.000 tonnes (850.000 tonnes en 1930).
- *Océanie* (Makatea) : 260.000 tonnes en 1929.
- *France* : 180.000 tonnes (250.000 tonnes en 1926).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Etats-Unis : 3.820.000 tonnes { *Floride* : 3.140.000 tonnes. *Tennessee* : 650.000 tonnes.

Iles non françaises du Pacifique : 1.000.000 tonnes environ (Accroissement rapide).
Egypte : 210.000 tonnes (300.000 tonnes en 1930).
Russie : 150.000 tonnes (Estimation).
Antilles Néerlandaises (Curaçao, Arabu) : 100.000 tonnes.

Puis viennent de petites productions, comprises entre 40.000 et 10.000 tonnes, de *Belgique* (en décroissance considérable par rapport à 1913), de *Pologne*, d'*Indo-Chine*, du *Japon*, de *Madagascar*, des *îles Seychelles*.

Il faut ajouter à ces chiffres la production de scories de déphosphoration. En France, par exemple, elle s'élève à 1.640.000 tonnes en 1929, venant, pour la majeure partie, de la Lorraine.

3. Gisements. — Les gisements de phosphates de chaux appartiennent à 3 types :

I. — Phosphates cristallisés en *apatite* : ce sont des gisements en rapport avec des roches ignées.

II. — Phosphates *sédimentaires* (nodules, craies phosphatées).

III. — Phosphates concrétionnés (*Phosphorites*).

I. — APATITE

Les gisements d'apatite ne jouent plus aucun rôle industriel ; mais ils ont un *intérêt théorique*, parce qu'ils constituent l'origine probable et lointaine de tous les autres gîtes de phosphate de chaux. L'apatite contient 91 % de phosphate tricalcique.

D'une façon générale, elle est très abondante en *inclusions* dans presque toutes les roches. La teneur augmente dans certaines d'entre elles : par exemple, dans celles qui sont *en relation avec les granulites* ; on y trouve, avec l'apatite, un groupe de minéraux riches en phosphates : wavellite, turquoise (phosphate d'alumine), amblygonite ou montebrasite (phosphate d'alumine fluorifère et lithinifère). Les gîtes de *Montebras* (Creuse), en particulier, sont constitués par de grands filons avec cassitérite, wolfram, apatite ou amblygonite suivant les points ; on y connaît aussi des greisen contenant de petits cristaux d'apatite bleue, très disséminés (2 à 3 millimètres).

On a exploité l'apatite surtout dans deux régions : dans la Péninsule Scandinave et au Canada.

1° Dans le Sud-Est de la *Norvège*, en particulier à *Oddegarden*, près d'Oslo, il existe toute une série de massifs de gabbros intercalés dans les gneiss et les schistes cristallins et recoupés par des filons transversaux de granulite ; la venue de l'apatite semble liée à celle de la granulite. Le phosphate se rencontre dans des filons de 20 centimètres à 1 mètre d'épaisseur, formés d'une roche à structure pegmatoïde, avec enstatite, hornblende, mica noir et, fréquemment, fer titané et magnétite. Ces minéraux atteignent de grandes dimensions qui prouvent une cristallisation lente

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

et tranquille et ils se développent très inégalement suivant les points. Au contact des filons d'apatite, les gabbros normaux à plagioclases se sont transformés en gabbros à *wernérite* (ou diorites à dipyre) par action d'*émanations chlorurées*, sodiques et calciques. Cette wernérite ne peut guère être distinguée qu'au microscope ; sa présence indique le rôle des fumerolles chlorurées dans la constitution du gisement ; sa formule est $R^3Al^4Si^6O^{21}$ avec R = (K^2, Ca, Na^2, Mg) ; en outre, elle contient toujours 2 à 4 % de chlore avec du fluor. Les gabbros se sont en même temps chargés de 2 à 5 % d'apatite. On a trouvé d'énormes poches de phosphate cristallisé, facilement exploitables à cause de la proximité de la mer, mais très irrégulières. L'apatite y est jaunâtre, cireuse, très compacte, surtout *chlorurée*.

En *Suède*, à *Gellivara*, l'apatite se rencontre de préférence dans des gabbros ou à leur contact immédiat. Elle se présente dans des filons pegmatiteux avec quartz, feldspath, hornblende, et elle y forme des nids et des amas très volumineux. Mais surtout les gisements de fer voisins sont très riches en phosphore, cristallisé en apatite en même temps que la magnétite et l'hématite. Il semble que, dans ce dernier cas, le phosphore ait une origine sédimentaire et que sa cristallisation soit due à des phénomènes de métamorphisme. Une séparation magnétique permet d'isoler le minerai de fer de l'apatite.

2° D'autres gisements analogues à ceux de Norvège, au *Canada* (région d'*Ottawa*), ont eu une certaine importance. L'apatite y est vert clair, saccharoïde, surtout *fluorée* (3 1/2 % de fluor contre 1/2 % de chlore). Elle n'est pas aussi directement liée aux gabbros. Elle forme des lentilles au milieu des pyroxénites, associées aux cipolins, dans les terrains cristallophylliens de la région ; ces lentilles ont des dimensions parfois considérables. On y a trouvé des cristaux pesant jusqu'à 400 kilogrammes.

3° Dans la région du *cap de Gate* (S.-E. de l'*Espagne*), il y a également des roches éruptives (trachytes rouges, etc.), contenant des apatites en cristaux verts de 3 à 4 millimètres disséminés dans la masse. Cette apatite n'est pas exploitable telle quelle ; mais les trachytes, très feldspathiques, s'altèrent et donnent un sable, très chargé en apatite et en potasse qu'on emploie dans les environs comme engrais.

II. — PHOSPHATES SÉDIMENTAIRES

Ce sont des dépôts sédimentaires de *faible profondeur* (entre 200 et 1.000 mètres), effectués à une distance plus ou moins grande du rivage. A proximité immédiate de la côte, ils ont formé des *rognons* et des *nodules* ; plus loin du littoral, ils sont à l'état de *craies phosphatées*.

Les *nodules* affectent, dans les terrains *primaires* (Silurien, Dévonien, Carbonifère), un aspect de galets sphériques bien roulés, à structure concentrique, se délitant par des surfaces courbes ; ce sont de véritables concrétions de phosphate aggloméré avec des matières organiques et charbonneuses, de coloration brune ou noire (*phosphates noirs*). La teneur des diverses parties du noyau et du ciment est variable. Dans les formations *jurassiques* et *crétacées*, les nodules paraissent beaucoup plus irré-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

guliers ; ce sont des rognons de couleur grise ou verdâtre, ayant pu donner l'idée de coprolithes, le plus souvent concrétionnés ; mais parfois ils ont été roulés et arrondis par la mer et s'associent d'ailleurs à des galets. On y rencontre des fossiles. Dans le Gault du Boulonnais, ils sont brillants, lustrés, à éclat métallique. En Russie, ils se trouvent, dans certains cas, agglomérés en une pierre dure utilisée jadis dans la construction.

Les *craies phosphatées*, d'âge *sénonien* et *éocène*, présentent le phosphate disséminé en petits grains brunâtres (craie brune ou craie piquetée) qui leur communiquent une densité assez forte. Elles ont une odeur fétide rappelant un peu celle des schistes bitumineux. Elles renferment quelquefois 7 ou 8 % de matière organique qui leur donne une consistance grasse et onctueuse. Associées à de nombreuses coquilles et à des dents de poissons (squales), elles correspondent à des zones où les courants venaient accumuler les organismes. Le phosphate y est presque toujours groupé autour de débris organisés ; sa teneur, assez faible, augmente avec leur nombre et on peut en conclure qu'il est d'origine organique. De même, quand on trouve des minerais de fer phosphoreux, on constate une relation entre le nombre des fossiles contenus et la teneur en phosphore (Lorraine, Kertch en Crimée).

Dans tous les cas, la concentration du phosphate est attribuée à l'*intervention des êtres organisés*, qui l'ont emprunté à l'apatite des roches et des terrains, par l'intermédiaire d'eaux dissolvantes douces ou salines : l'apatite dissoute dans l'eau est entraînée dans la mer où elle sert à l'alimentation des animaux marins. On a parfois expliqué les accumulations d'organismes par des hécatombes (surtout de poissons) dues à des variations brusques de température : ainsi, sur les côtes américaines, de telles destructions se produisent dans la zone de fonte des icebergs au contact du courant chaud du Gulf-Stream.

Les gisements sédimentaires correspondent d'ordinaire à des périodes de *transgression marine*, où un emprunt aux sédiments continentaux et aux roches érodées a pu quelquefois intervenir : transgressions dévonienne, liasique, infracrétacée, éocène, etc., consécutives aux phases de plissements.

Les terrains phosphatés forment des couches généralement peu épaisses (de quelques centimètres à un mètre pour les cordons de nodules ; rarement plus de dix mètres pour les craies phosphatées).

En outre, il y a lieu de tenir compte des phénomènes d'*altérations* et de *concentrations continentales* qui ont pour résultat d'élever considérablement la teneur des terrains phosphatés aux affleurements, grâce à la circulation des eaux et à la solubilité du phosphate qui tend à se précipiter sur des centres d'attraction. Dans l'Auxois, on n'a pu exploiter que les affleurements. A Beauval, il y a eu concentration des phosphates dans des sables, en poches au milieu de la craie.

Nous allons étudier les principaux gisements de phosphates sédimentaires, en remarquant que leur faciès habituel est caractéristique de leur âge.

1. Phosphates archéens. — Nous avons rappelé plus haut leur présence

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en *Scandinavie*, dans les minerais de fer de *Gellivara*. On en trouve aussi au *Canada*.

2. Phosphates noirs siluriens et dévoniens. — On en rencontre dans le *Pays de Galles*, dans le Silurien, où il existe un certain nombre de niveaux phosphatés intercalés entre les schistes gréseux gothlandiens et le calcaire ordovicien de Bala. A la partie inférieure des schistes, se développe un lit de phosphates noirs contenant une forte proportion de graphite ; l'épaisseur de la couche est d'environ 1 mètre ; elle contient beaucoup de pyrite et de sulfate de baryum.

Des gisements analogues sont connus en *Russie*, en *Podolie* (bassin du Dniester) ; ils se trouvent dans le Gothlandien et sont constitués par des nodules noirs formant de véritables boulets avec une forte proportion de matières organiques (au milieu de schistes). Les nodules ont une structure fibreuse et radiée et renferment un noyau interne de calcite (teneur de 70 %).

Au *Tennessee* (Etats-Unis), les phosphates sont en relation avec la transgression néodévonienne au-dessus du Silurien. Ils sont intercalés dans un lit de schistes charbonneux en discordance sur le calcaire gothlandien et épais de 70 mètres. Cette série schisteuse phosphatée représente le passage du Dévonien au Carbonifère. A la base, on trouve du phosphate en roche noir ou brun foncé, souvent à faciès oolithique ou granuleux, presque totalement dépourvu de CO^3Ca, contenant des matières organiques. Ce niveau exploité a une réelle importance industrielle (27 à 30 % d'acide phosphorique). Au-dessus vient une couche à nodules (30 centimètres), sphériques ou aplatis, noirs ou bruns.

Dans l'*Arkansas* existe un niveau géologique analogue, mais peu important (Dévonien supérieur), avec une couche de phosphate en roche passant vers le haut à un grès à nodules noirs concrétionnés et graphiteux.

Dans les *Pyrénées*, les phosphates du Dévonien supérieur ont une grande extension. On les a exploités à *Las Cabessès* (Ariège) en même temps que le manganèse dont nous reparlerons. Ils forment un niveau constant au-dessus des calcaires griottes du Dévonien, sous les schistes carbonifères. Leur aspect général est celui d'une roche noire schisteuse ou feuilletée brillante, se délitant suivant des surfaces courbes, associée à des matières hydrocarburées. Par endroits, les nodules arrivent à s'isoler, sphériques ou aplatis, formés de zones concentriques. La teneur est très irrégulière et généralement très faible. Les nodules triés donnent jusqu'à 60-65 % ; les schistes noirs noduleux 45 %. Mais, si l'on fait abstraction des nodules, la teneur tombe au-dessous de 35 % et même 15 %. La coloration noire et salissante de ces engrais a nui à leur commerce.

3. Phosphates carbonifères. — Ils ne sont jamais très développés. Ce sont des nodules noirâtres de phosphates concrétionnés qui se substituent à la sphérosidérite ; il y a là encore l'association du phosphore et du fer qui est si fréquente (schistes argileux de Fins, Allier). Ailleurs on a des imprégnations phosphatées dans des calcaires bitumineux (à 7 %).

4. Phosphates du Jurassique. — Les niveaux phosphatés se placent à la

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

fin des périodes de régression, accompagnant des minerais de fer et résultant probablement, comme eux, de la destruction d'une grande quantité de matériaux continentaux. Nodules gris, verts, irréguliers, à reflets métalliques et coquillages englobés.

a) Une première série de niveaux se trouve dans le *Lias*.

Celui-ci débute, au *Rhétien*, dans certaines régions, en particulier dans le Nord de la France, par des grès détritiques, arkosiques, avec *bone-beds* ou lits à ossements.

Un peu plus tard, au *Sinémurien*, les sédiments deviennent calcaires et ils s'accompagnent de phosphates, par exemple dans l'*Auxois* sur le bord N.-E. du Morvan. Dans cette région, les phosphates sont associés à des minerais de fer et de vanadium et ils ne sont exploitables qu'en affleurement, au milieu des argiles rouges de décalcification, par des tranchées temporaires de 3 mètres de profondeur environ, faites sur des terrains loués. Cette industrie, aujourd'hui réduite presque à rien, a occupé jusqu'à 500 ouvriers ; on obtenait 30 kilogrammes de nodules par mètre carré ; ceux-ci contenaient environ 5 % de $CaFl^2$ et 55 à 65 % de phosphate.

Le même niveau dans les calcaires à Gryphées arquées a été exploité dans la *Haute-Saône* et se retrouve dans le *Cher* et l'*Indre*.

Le *Toarcien* n'est qu'indirectement une source de phosphates ; les oolithes ferrugineuses ou minettes de *Lorraine* donnent des scories de déphosphoration. C'est un exemple net d'association des minerais de fer et du phosphore ; il y a environ 1 % d'acide phosphorique dans l'ensemble des minerais de ce niveau. Les scories ont une teneur de 17 % d'acide phosphorique. On les emploie après les avoir finement moulues.

b) Le *Jurassique moyen et supérieur* est beaucoup moins riche en phosphates. On n'y trouve pas de niveaux exploitables. Nous citerons seulement des couches phosphatées dans le *Bajocien* du Calvados, de l'Anjou, du Centre de la France, de l'Ardèche, analogues à celles du Sinémurien ; d'autres existent dans le *Callovien* et l'*Oxfordien*, dans la Nièvre, dans le Cher et en Franconie.

5. Phosphates du Crétacé inférieur. — Le Néocomien et l'Albien correspondent, suivant les régions, à la période de transgression qui marque le retour de la mer dans les pays émergés à la fin du Jurassique. Les phosphates à l'état de nodules, à aspect métallique, formés souvent autour d'un fossile et sans grand intérêt industriel, sont surtout en rapport avec les *sables verts* de l'Aptien et de l'Albien, alternant avec des argiles fines. On les a exploités dans le Boulonnais, la Meuse, l'Ardenne, la Drôme, l'Ain, en Angleterre, en Russie.

Dans le *Boulonnais*, où le socle primaire apparaît à la faveur d'un pli anticlinal, surmonté de Jurassique et de Crétacé, la couche de nodules (10 centimètres) se développe entre les sables verts aptiens et les argiles noires de Folkestone albiennes. Les nodules sont englobés dans une argile très tenace, Beaucoup de débris fossiles les accompagnent.

L'*Ardenne*, qui connut une grande ère de prospérité à partir de 1855 et qui occupait 400 ouvriers en 1886, est aujourd'hui abandonnée. Les sables verts horizontaux y ont 25 à 45 mètres d'épaisseur ; il s'y trouve une couche

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

peu épaisse (10, 15, 20 centimètres), véritable cordon de phosphates en nodules, séparés ou agglomérés en poudingues. La teneur est, en moyenne, de 18 % d'acide phosphorique (39 % de phosphate de chaux). Les nodules ou *coquins* sont généralement lisses, arrondis, mamelonnés, brun grisâtre, très durs ; ils ont la grosseur d'une noix ou du poing. Ils s'accompagnent de beaucoup de fossiles. L'exploitation se faisait à ciel ouvert, par tranchées, quelquefois par petits puits (aux environs de *Grandpré*, en Argonne).

Dans la *Drôme*, à *Saint-Paul-Trois-Châteaux*, il y avait plusieurs petits lits, d'épaisseur très variable, échelonnés sur une hauteur totale de 6 à 12 mètres. Les sables verts albiens y sont éminemment terrigènes ; on y trouve, outre les phosphates, des galets et des accumulations de coquillages. La teneur était de 38 à 50 % de phosphate.

Dans l'*Ain*, on exploitait, il y a peu de temps encore, les phosphates des sables verts de *Bellegarde*, bien connus par l'abondance des fossiles qu'ils ont fournis à toutes les collections (Perte du Rhône).

En *Angleterre*, il existe une discordance à la base du Crétacé ; une émersion s'y est produite à la fin du Jurassique, pendant laquelle il s'est déposé des couches saumâtres et d'eau douce (Purbeck), puis terrestres (Weald). Ensuite viennent des dépôts transgressifs, appartenant à l'Aptien (argiles et sables du Lower Greensand), à l'Albien (argiles), au Cénomanien (grès verts : Upper Greensand), mais tous de nature littorale avec des débris enlevés aux terrains sous-jacents. On y trouve de nombreux niveaux de phosphates et la coupe est la suivante de haut en bas :

Phosphates de Suffolk ; } (Eocène).
Argiles de Londres ; }
Craie phosphatée de Taplow ;
Marnes et calcaire (Crétacé supérieur) ;
Upper Greensand (Cénomanien) ;
Phosphates d'Ely ;
Gault (Albien, 60 mètres) ;
Argiles et *phosphates* de Folkestone, de Boulogne ;
Lower Greensand (Aptien. 500 mètres) ;
Phosphates de Sandy ;
Weald (Crétacé inférieur) ;
Jurassique (Oolithe).

Ces phosphates ont joué un grand rôle autrefois ; ils ont été les premiers utilisés dans le monde ; aujourd'hui ils sont tombés à peu près à rien. Dans ceux de *Sandy* (50 centimètres d'épaisseur) on trouvait beaucoup de fossiles, en particulier des ossements cimentés par un sable ferrugineux et provenant en partie des terrains sous-jacents. Ces fossiles ne sont pas la cause directe de la formation phosphatée, car ils ont été eux-mêmes transformés en phosphates par un phénomène ultérieur ; mais il est possible que les organismes auxquels ils appartenaient aient fourni, par leur matière organique, le phosphate nécessaire.

6. Nodules phosphatés du Crétacé supérieur. — En *Russie*, il y a de grands niveaux phosphatés qui sont plutôt des réserves pour l'avenir. Les couches à phosphates sont développées au Sud de Moscou, le long du Dnieper et de la Volga, dans l'Albien et surtout le Cénomanien ; on a com-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

mencé à les exploiter à *Smolensk, Kiew, Nijni-Novgorod.* La région de *Koursk* possède un niveau de craie phosphatée, qui s'abaisse lentement vers le Dnieper et le Don jusqu'au-dessous du niveau de la mer ; on l'a d'abord utilisée comme pierre de construction ; la couche principale (15 à 30 centimètres) est un agglomérat de rognons de phosphates à ciment calcaire. On y trouve de nombreux fossiles qui paraissent avoir été, en partie, empruntés à des terrains antérieurs. La région de *Tambow* présente des gisements analogues. La couche (60 centimètres d'épaisseur) contient des phosphates en dalles, blocs, nodules à raison de 30.000 tonnes par hectare. Celle de *Saratow* (Volga) s'étend sur plus de 40 kilomètres ; le phos-



Fig. 57. — Carte montrant l'extension présumée des zones phosphatées de Russie.

phate y abonde en débris organiques ; les terrains encaissants ont tous une odeur fétide, tenant à l'existence de matières organiques, associées aux phosphates.

Dans le *Nord de la France*, à *Pernes* et à *Fauquembergues*, les assises inférieures de la craie (Cénomanien) sont très amincies et constituées par un poudingue passant à des argiles glauconieuses peu phosphatées (*Tourtia*), aquifères, qui, en certains points, se chargent de phosphates comme à Pernes, où la succession est :

Sables verts et glauconieux ;
Bancs de nodules (1 mètre) ;
Lit d'argile, 20 à 25 centimètres (Gault) ;
Schistes violacés (Dévonien).

Ces niveaux phosphatés disparaissent quand on s'élève dans la série ; cependant on les retrouve sur le bord du Bassin parisien. Ainsi dans la

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Sarthe, on connaît des niveaux intercalés dans la craie à *Inoceramus labiatus* et dans celle à *Ostrea columba* (Ferté Bernard, Connerré) ; ils sont constitués par des nodules empâtés dans des sables.

7. Craies phosphatées sénoniennes, — En *Picardie* et en *Belgique*, les niveaux phosphatés sénoniens ont le faciès tout spécial de *craie brune* ou de *craie piquetée* à dents de squales, exploitée à *Ciply* (Belgique), *Beauval* (Somme), *Hardivillers* (Oise), et dans laquelle sont disséminés une série de petits points jaunâtres. Ces couches phosphatées, campaniennes en Picardie, occupent des surfaces énormes ; mais leur teneur y est très

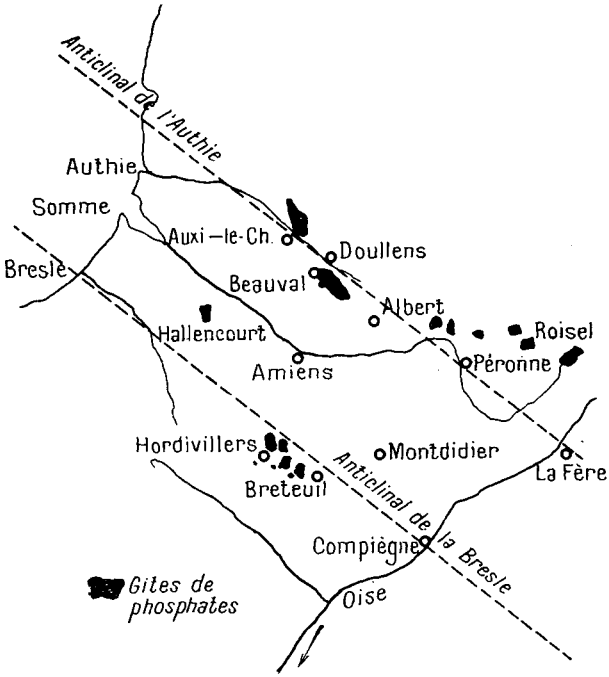


Fig. 58. — Carte des phosphates de la Somme et de l'Oise.

variable (10 à 50 %) et il faut chercher beaucoup pour trouver des points d'enrichissement naturel réellement exploitables. Dans le gîte de *Beauval* (Somme), l'origine du phosphate est une craie phosphatée campanienne ; mais il y a eu enrichissement superficiel, local, ayant donné lieu à des poches de sables phosphatés, signalées dès 1849, exploitées seulement en 1886, à la suite de l'analyse chimique de sables, employés pour la briqueterie et donnant une couleur violette. Ces sables contiennent 78 % de phosphate. La craie, pauvre en phosphate à l'origine, a été légèrement plissée et a subi des concentrations superficielles sur les parties anticlinales. Ces produits de concentration se sont eux-mêmes enrichis et ont donné des poches ; il s'agit simplement d'une altération superficielle sur les points en saillie.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les phosphates belges de *Ciply* se trouvent à un niveau un peu plus élevé du Sénonien supérieur, dans le Maëstrichtien qui est recouvert par le Danien. La craie phosphatée a une faible teneur : 23 à 25 % ; aussi a-t-on cherché à l'enrichir mécaniquement par classement dans un courant d'air qui sépare les petits nodules de phosphate de leur gangue ; mais ces nodules eux-mêmes ne sont guère qu'à 60 %. En quelques points, on a trouvé des gîtes d'enrichissement analogues à ceux de Beauval.

A l'Est de la *Palestine* se trouvent des gisements sénoniens identiques à teneur de 40 à 45 % avec des poches d'enrichissement tenant jusqu'à 80 %.

8. Craies phosphatées éocènes, — Les phosphates prennent à cette époque un développement considérable en *Algérie*, *Tunisie* et *Maroc*. C'est en 1873 que Thomas signala l'existence d'un niveau éocène riche en phosphate dans la province d'Alger. Une foule de tentatives furent

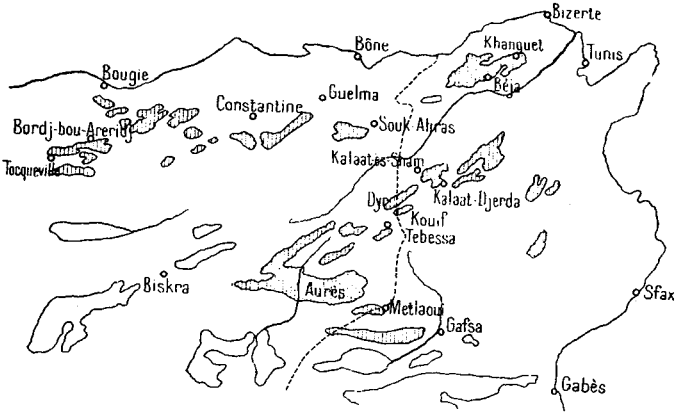


Fig. 59. — Carte des phosphates algériens et tunisiens.

faites, après 1887, d'abord à *Souk-Ahras* et le long de la ligne d'Alger à Tunis ; elles furent peu fructueuses, sauf en quelques points enrichis : *Béja*, *Khanguet*, *Tocqueville*, *Bordj-bou-Areridj*. On exploita ensuite, en 1892 les environs de *Tébessa* et la région du *Dyr* ; puis on découvrit les gîtes très riches et très considérables de *Gafsa* (1898). Depuis on est revenu à la région frontière (Kalaat-ès-Snam, Kalaat-Djerda). Il y a, d'ailleurs, dans la région sud du département de Constantine, des zones phosphatées qui s'étendent jusque dans la région de l'Aurès et de Biskra.

La coupe des terrains géologiques dans lesquels se trouvent ces gisements est très caractéristique (fig. 60) :

Lumachelle et calcaire nummulitique fossilifère formant des tables (Kalaat) horizontales [Nu].

Niveau phosphaté [Ph] = alternance de marnes à nodules et de calcaires phosphatés.

Limons argileux noirâtres (120 mètres) avec chlorure de sodium, gypse, et quantité de silex blancs superficiels que les Arabes prennent pour des ossements (Arg.).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Le tout correspond à une transgression suessonienne, en discordance sur le Crétacé.

Suivant les points, les phosphates ne sont pas rigoureusement du même âge. Cela tient au phénomène de transgression (avec remaniement des terrains antérieurs) qui paraît avoir progressé du Nord vers le Sud (Thanétien à Tébessa ; Eocène moyen à Gafsa).

Les véritables phosphates industriels se présentent sous la forme d'une craie phosphatée (densité 2) à odeur fétide, à couleur variable (blanc, jaunâtre, verdâtre), s'écrasant facilement sous les doigts, devenant très friable à l'air. Ils contiennent des dents de squales, des coprolithes de poissons, des restes de sauriens. Les points où la teneur est suffisante pour permettre l'exploitation sont assez rares. Au Dyr, une enquête administrative, faite sur toute la longueur des affleurements, a montré qu'en dehors du point où se trouve l'exploitation Crokston, un seul, à 50 kilomètres au Nord, était assez riche et pouvait contenir 100.000 tonnes entre 65 et 70 %. Dans toute cette région, la teneur normale est de 50 %. Aux environs de *Tebessa*, les exploitations portent sur les deux plateaux du *Dyr* et du *Kouif*, presque horizontaux.

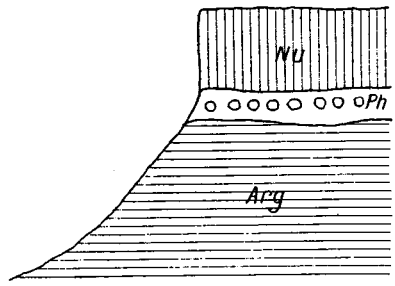


Fig. 60. — Coupe schématique d'un gîte de phosphate algérien.

Aux environs de *Gafsa*, les couches tertiaires sont très plissées ; elles forment de véritables anticlinaux où les sédiments sont parfois relevés presque jusqu'à la verticale. Ce fut au début une gêne pour l'exploitation. Ces phosphates appartiennent peut-être à l'Eocène moyen. Les plus grandes exploitations se trouvent à *Metlaoui*, où il existe 4 couches principales de phosphates séparées par des alternances de marnes et des lits de galets.

Phosphate couche n° 1 — *Phosphate*	2,40
Lits de petits galets.	
Phosphate	0,80
Coquilles et boulets	0,02
Phosphate	0,70
Gros galets.	
Phosphate	0,90
Marnes	0,15
Phosphate et galets	0,15
Marnes	0,25
Phosphate couche n° 2 — *Phosphate*	1,10
Galets.	
Phosphate	0,70
Galets et phosphate	0,30
Marnes et alternances phosphatées	5
Phosphate couche n° 3	0,80
Marnes et petits bancs calcaires	4,50

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Phosphate couche n° 4	*Phosphate*	0,60
	Calcaires et Marnes	0,60
	Phosphate	0,80

Calcaire à Lumachelles.

L'existence des phosphates est donc liée, ici comme ailleurs, à des phénomènes détritiques ayant amené les galets. La teneur moyenne est de 60 % dans la couche n° 1, de 62 % dans la couche n° 2. On doit faire sécher le phosphate avant de le livrer au commerce. On a construit, pour l'évacuation de ces phosphates, un chemin de fer spécial de Sfax à Gafsa ; on exploite actuellement, en temps normal, près de 2 millions de tonnes.

Au *Maroc* (région de Kourigha, notamment), se poursuivent les gisements de craie phosphatée algériens, dans un niveau un peu différent entre le sénonien et le lutécien et avec une teneur plus forte qu'à Gafsa (jusque 75 % en moyenne 68 %). L'exploitation commencée en1922 donne déjà des résultats surprenants. [El Boroudj à 150 kilomètres de Casa Blanca ; Oued Zem à 115 kilomètres, etc.]. La formation a de 20 à 30 mètres, avec des alternances de marnes et s'étend sur 1.000 kilomètres carrés. On a évalué le tonnage à 2 milliards de tonnes.

9. Phosphates de concentration superficielle sur des terrains calcaires récents, déjà légèrement phosphatés. — Aux *Etats-Unis*, existent deux gisements très importants appartenant à ce type : Caroline et Floride.

Les gîtes phosphatés de la *Caroline du Sud* ont été si importants qu'ils ont été le régulateur du marché pendant 40 ans. Exploités depuis 1867, ils sont aujourd'hui presque épuisés.

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 mètres de profondeur, un lit de nodules dans une marne plus ou moins siliceuse. Au-dessous vient un calcaire oligocène, très raviné par les formations précédentes, riche en phosphate à sa partie supérieure et s'appauvrissant vers le bas jusqu'à 8 % de phosphate.

Il semble que ce calcaire ait été enrichi en phosphate à sa partie supérieure par des phénomènes de concentration continentale. Puis il a été recouvert par une transgression marine qui l'a remanié et qui a donné le lit de nodules, véritables galets et fragments roulés. Ce lit peut atteindre un mètre. Les nodules sont riches et associés à des ossements d'âge très divers (oligocènes et actuels) qui, eux-mêmes, sont très enrichis en phosphate. Teneur moyenne : 60 %.

Les gîtes de *Floride*, ont une importance toujours croissante. Ils se rapprochent beaucoup des précédents. La Floride est une presqu'île couverte de savanes, de larges étangs et d'épaisses forêts, qui ont été, au début, une source de grandes difficultés pour l'exploitation. Les pénétrations et circulations souterraines des eaux, au milieu de calcaires fissurés, y sont fréquentes et ont dû contribuer à la concentration des phosphates. Le pays comprend une série concordante de calcaires oligocènes (en particulier, la formation de Vicksbourg légèrement phosphatée) et de calcaires miocènes, eux-mêmes légèrement phosphatés. Ces deux catégories

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

de calcaires ont donné lieu à des concentrations de phosphates (le *hard-rock*). Puis vient une série pliocène de sables et argiles, formée par une transgression après une période d'émersion, et à la base de laquelle se trouve une couche à nodules (*land pebbles*) qui peut atteindre 10 mètres. Enfin le remaniement par les cours d'eau actuels a donné des nodules de rivières (*river pebbles*). L'aspect du hard rock est celui d'un conglomérat torrentiel avec fragments de calcaire phosphaté à haute teneur (75-80 %) ; il s'y développe des poches de sables très riches, plus ou moins argileux.

L'exploitation se fait de deux façons : sur la terre ferme et par dragages en rivière.

Les gîtes des *Iles Océaniques* présentent de grandes analogies avec ceux de Floride. Depuis 1900, on a mis en exploitation les îles anglaises *Christmas* (Sud de Java) et *Océan*, les îles ex-allemandes d'*Angaur* (groupe des Palau) et *Maurou* (entre les Marshall et les Salomon), l'île française de *Makatéa* (archipel de la Société, près de Tahiti), *Clipperton* (Sud du Mexique).

Ce sont des îlots coralliens, formés par des calcaires d'âge tertiaire, ayant subi l'action des eaux de surface, qui y ont donné naissance à des grottes. Le calcaire est lui-même légèrement phosphaté (moins de 1 %). Mais surtout on trouve à sa partie supérieure d'énormes poches où se sont faites des concentrations de phosphate à 70-85 % (sables phosphatés avec concrétions phosphatées). Leur origine est problématique : il ne semble pas qu'il s'agisse d'un dépôt fait directement sous sa forme actuelle dans le calcaire ; peut-être y a-t-il eu d'abord un calcaire faiblement phosphaté dans les conditions littorales habituelles. Ce calcaire aurait été recouvert d'une accumulation de matières organiques (guano), qui aurait imbibé et phosphatisé la roche sous-jacente. En tout cas, le dernier phénomène a été une concentration d'origine secondaire et superficielle comme celle que l'on observe en Floride, dans le Quercy, à Beauval, etc... Il est à noter qu'aux îles *Chinchas*, les guanos forment de même des concentrations phosphatées sur le calcaire sous-jacent. Enfin il est curieux que ces formations soient localisées dans une zone de 15 ou 20° au Nord et au Sud de l'Equateur.

III. — PHOSPHORITES

Les phosphorites, formées d'apatite concrétionnée, résultent d'altération et de remise en mouvement des phosphates sédimentaires. De très belle qualité, elles ont connu une période de prospérité ; mais, comme tous les minerais superficiels, elles se trouvent en quantité assez limitée et sont actuellement presque complètement épuisées.

Au lieu de couches ou de lits à nodules, nous avons ici des poches verticales ou des sortes de filons remplis de phosphate concrétionné, dont l'origine paraît être due à des phénomènes de dissolution dans des terrains faiblement phosphatés. Toutefois certains gisements (Logrosan, Cacérès), à allure nettement filonienne, sont parfois décrits comme des filons d'origine hydrothermale interne.

Quercy (Tarn-et-Garonne) ; *Caylus* (Aveyron). La région est formée de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

plateaux de calcaire jurassique, les Causses, donnant lieu à une intense circulation d'eau en profondeur et à la formation d'excavations souterraines de formes bizarres (grottes, avens, rivières souterraines). Certaines de ces poches du calcaire présentent un remplissage de nature variable (tantôt argiles de décalcification, tantôt argiles contenant des concrétions manganésifères et ferrugineuses, tantôt sables kaoliniques, tantôt silice, tantôt phosphates). Ces phosphates ont une structure plus ou moins concrétionnée ; ils sont gris, blancs, bleuâtres et ont un aspect semblable à l'agate ; mais ils se laissent rayer par l'acier. Ils sont associés au manganèse, à la silice et contiennent un peu d'iode et de fluor. Ils ont une teneur moyenne de 65 % qui peut aller jusqu'à 80 %. Ils forment surtout un revêtement contre les parois de la poche calcaire, le centre étant occupé par des terres argileuses phosphatées où le phosphate arrive à se concentrer en grains et en rognons. Ces remplissages comprennent, en outre, des accumulations d'ossements d'animaux oligocènes et pléistocènes, tombés dans les fentes du calcaire ou apportés par les eaux ; l'âge du creusement semble remonter jusqu'à l'Oligocène. Le phosphate paraît être emprunté aux terrains encaissants, légèrement phosphatés. Il est possible, d'ailleurs, qu'une petite partie provienne des tissus des animaux accumulés dans ces avens.

Estrémadure (Sud-Ouest de l'Espagne) : *Cacérès* et *Logrosan*. — Dans cette région, il y a un certain nombre de massifs granitiques qui recoupent les terrains primaires et sont accompagnés de filons d'étain ; on y trouve du wolfram, du molybdène, des minerais d'urane ; on y rencontre aussi d'autres filons qui recoupent les schistes cambriens et siluriens et les calcaires dévoniens et qui sont remplis de phosphorites. Ces filons incrustent une série de fractures parallèles, nettes dans le granite où elles pénètrent peu, éparpillées dans les schistes, élargies dans les calcaires avec formation de véritables gîtes de contact. On a pu les suivre jusqu'à 150 mètres de profondeur et on a constaté leur disparition. Il s'agit d'une phosphorite très cristalline. En profondeur, un appauvrissement paraît se produire ; mais de récentes tentatives de reprise ont montré que cela pouvait tenir au drainage souterrain entraînant le phosphate soluble. Malgré les apparences filoniennes, il ne semble pas que l'origine soit fumerollienne, mais qu'elle tienne à une introduction per descensum de solutions phosphatées, empruntées aux terrains ou à des matières organiques.

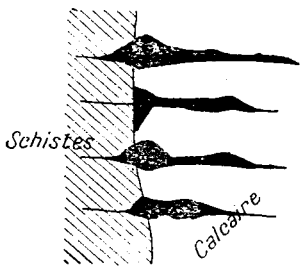


Fig. 61. — Plan théorique des filons de Cacérès.

Nassau. — Dans le Nassau, on trouve, dans les calcaires eifféliens (dévoniens), alternant avec des schistes, des poches produites par une altération continentale (éocène) et remplies d'argiles de décalcification avec concrétions de manganèse et nodules phosphatés. Ceux-ci sont roses, agatisés (70 %).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

IV. — DÉPÔTS PHOSPHATSÉ DES GROTTES

Enfin, dans certaines grottes (grotte de la Minerve dans l'Hérault), se rencontrent des dépôts locaux de phosphate de calcium, plus ou moins mélangé de phosphates alumineux (minervite). Ces dépôts sont généralement recouverts par une terre phosphatée (à 18 % acide phosphorique) renfermant de nombreux ossements qui proviennent des animaux ayant habité ces grottes. L'acide phosphorique des tissus animaux a dû être entraîné par les eaux souterraines à l'état de phosphate d'ammoniaque d'origine bactérienne et être reprécipité sur le calcaire des parois.

Dans le même ordre d'idée, on peut citer, dans des cavernes habitées par des légions de chauves-souris, d'importants dépôts d'un guano, riche en phosphore, qui a pu être remanié par les eaux.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE VII

VANADIUM

1. Usages. — Pendant longtemps, le vanadium, étant très rare, a eu peu d'usages. On s'en est servi dans la préparation d'une *encre noire* à base de vanadate d'ammoniaque, puis dans l'industrie de l'*impression des étoffes* avec les couleurs dérivées de la houille (fabrication du noir d'aniline).

Ses applications devinrent plus importantes quand on l'employa en *métallurgie*, grâce à la découverte de gisements plus abondants (à partir de 1896). Le vanadium augmente brusquement la limite élastique et la charge de rupture de l'acier. On se sert des aciers au vanadium pour les fraises, les forets (supérieurs aux aciers au tungstène). Pour les plaques de blindage, l'acier-nickel vanadié à 12 % de Ni et 0,5 % de vanadium permet d'obtenir une résistance double avec la même épaisseur. Le vanadium, qui a une très grande affinité pour le carbone et l'oxygène, exige des précautions particulières pour son incorporation à l'acier : on l'emploie sous forme de ferro-vanadium à 30-50 %.

2. Gisements. — Métal très répandu, mais généralement en faibles traces, le vanadium est souvent *associé au phosphore dans les minerais de fer* : d'où il passe, avec l'acide phosphorique, dans la fonte, puis dans la scorie d'affinage. Ainsi les minerais de *Mazenay* (Saône-et-Loire), d'abord employés au Creusot, en renferment.

Il existe, en outre, un certain nombre de minéraux vanadiés. On connaît des *micas vanadiés* (*roscoélite*) au *Colorado*, dans des grès dont les grains de quartz sont enveloppés par ces micas ; l'uranium s'y trouve associé au vanadium, sous forme de *carnotite* (K^2O, $2U^2O^3$, V^2O^5, $3H^2O$).

Des *vanadates* se développent sur les affleurements de divers filons (Pb, Cu, Bi), par concentrations superficielles des éléments vanadiés, dans des conditions analogues à celles où se produisent les phosphates, molybdates, arséniates, etc... Ainsi se forment le vanadate de plomb (*descloizite*) et le chloro-vanadate de plomb (*vanadinite*), isomorphe de l'apatite, la *mottramite* (vanadate de plomb et de cuivre), etc. Le vanadate de plomb forme des concrétions grisâtres, verdâtres ; il est exploité au Mexique, en Argentine, au Chili, au Colorado, etc...

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

3. Pays producteurs, — Les principaux pays producteurs de minerais vanadiés sont :

le *Sud-Ouest africain britannique* dont la production s'est élevée à 4.000 tonnes de concentrés en 1925, 5.150 en 1926, 3.100 en 1929 et 4.500 en 1930 ;

la *Rhodésia du Nord* qui, en 1929, a produit 600 tonnes d'oxyde et 570 tonnes de ferrovanadium à 34 % ;

le *Pérou* dont la production est sujette à des fluctuations importantes :

1920	1.100 tonnes	de vanadium
1922	Rien	
1924	610 tonnes	»
1925	250 tonnes	»
1926	850 tonnes	»
1928	70 tonnes	»
1929	810 tonnes	»

enfin les *Etats-Unis* (Utah et Colorado).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE VIII

ARSENIC ET ANTIMOINE

L'arsenic et l'antimoine forment beaucoup de minerais complexes en se substituant ou s'associant au soufre pour s'unir aux métaux.

On connaît, en outre, des cas assez rares, où l'arsenic et l'antimoine sont seuls à faire partie de combinaisons métalliques où le soufre n'entre pas.

L'arsenic et l'antimoine, qui se rapprochent ainsi du soufre et des métalloïdes par leurs propriétés chimiques, ont par ailleurs des propriétés métalliques.

A. — ARSENIC

1. Usages. — Les principales substances arsenicales utilisées sont l'arsenic métallique, l'acide arsénieux (As^2O^3), l'anhydride arsénique (As^2O^5), des arséniates divers et le réalgar (As^2S^2).

L'Arsenic métallique entre dans la composition de quelques verres 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.

L'anhydride arsénieux est adopté dans les verreries pour obtenir certaines apparences porcelainées. Il sert dans la fabrication du vert de Scheele, du vert de Schweinfurt, du réalgar. On l'emploie pour chauler les blés, pour empoisonner les animaux nuisibles.

L'anhydride arsénique est utilisé dans l'impression des toiles peintes, dans la fabrication du rouge d'aniline. A petite dose, c'est un remède contre l'asthme ; à haute dose, c'est un poison violent.

Les *arséniates* s'emploient dans la préparation de couleurs jaunes et vertes, qui ont l'inconvénient d'être vénéneuses.

Le *réalgar* sert en pyrotechnie et pour la peinture.

Enfin de nombreux produits arsenicaux ont des usages en pharmacie. Malgré le peu d'importance de ces applications, la consommation de l'arsenic tend à s'accroître.

2. Statistique. — La production mondiale d'arsenic est comprise entre 30 et 40.000 tonnes. Les Etats-Unis en produisent le tiers : 9.000 tonnes (en 1929). Le Mexique arrive à fournir 9.700 tonnes (en 1929). La France, et l'Algérie, 5.000 tonnes (1929). La Suède, plus de 4.000 tonnes (1927). Le

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Canada, 2.400 tonnes (1929). L'Allemagne, 1.700 tonnes (1929). Le Japon, près de 1.500 tonnes. L'Angleterre, 750 tonnes.

3. Minerais. — *L'arsenic* se trouve souvent comme impureté gênante dans des minerais : pyrite de fer, minerais de fer comme ceux de Tabarka en Tunisie. On grille ces minerais et on extrait alors l'arsenic comme sous-produit, surtout quand des mesures légales prohibent le rejet dans l'atmosphère des fumées arsenicales.

Mais le véritable minerai d'arsenic, c'est le *mispickel* (sulfo-arséniure de fer), qui contient souvent un peu d'or.

Les autres minerais, moins importants, sont des sulfures : *réalgar* (As^2S^2) et *orpiment* (As^2S^3), des *arséniures* métalliques ou des *sulfo-arséniures* ; des produits d'altération comme les *arséniates* et *l'arsenic natif*.

4. Gisements. — L'arsenic est essentiellement un produit de filon ou de départ volatil.

I. Les GISEMENTS DE MISPICKEL se présentent comme ceux de la pyrite, à laquelle ce minéral est fréquemment associé ;

a) En filons-couches et en imprégnations diffuses dans les terrains métamorphiques (*Brésil*) ; mispickel parfois aurifère.

b) En filons proprement dits associés aux minéraux du groupe de l'étain (cassitérite, wolfram). Tels sont les filons de *Vaulry* (Haute-Vienne) et du *Cornwall* anglais.

En *Angleterre*, les mines du *Devonshire*, du *Cornwall* exploitent des mispickels associés à Bi, Mo, W, à gangue quartzeuse, fréquemment aurifères. Les mispickels aurifères, jadis délaissés par suite des difficultés de leur traitement, sont aujourd'hui traités et ils donnent de l'arsenic comme sous-produit. Ils sont plus abondants que les pyrites aurifères et la teneur en or semble parfois croître avec celle de l'arsenic.

En *Bohême*, la mine de *Joachimsthal* exploite aussi des mispickels.

II. — Il existe en outre des FILONS ARSENICAUX COMPLEXES, où l'on rencontre de l'arsenic natif dans les produits d'altération superficielle. Ainsi, en *Allemagne*, les mines de la région de *Freiberg* donnent quelquefois de l'arsenic natif contenant jusqu'à 4 % d'argent et résultant probablement de l'altération et de la réduction du mispickel. De même, en *France*, on a trouvé de gros blocs d'arsenic natif (aspect testacé, mamelonné) dans les filons cobalto-argentifères de *Sainte-Marie-aux-Mines* (Alsace) et des *Chalanches* (Isère).

III. — Quant au RÉALGAR et à l'ORPIMENT, ils se déposent assez fréquemment dans des sources thermales actuelles à la manière du cinabre (dépôts des geysers du *Yellowstone Park* et des sources de *Saint-Nectaire*, dans le Puy-de-Dôme). Ils apparaissent aussi dans les filons tertiaires, où il leur arrive d'accompagner le mercure, l'or et l'argent. Ainsi, dans la *péninsule balkanique* (*Albanie, Macédoine*), on connaît des ensembles complexes où entrent les cuivres gris, la stibine, le réalgar et le cinabre ; de même, en *Chine* (*Yunnan*). En *Corse*, à *Matra*, les sulfures forment des poches avec calcite dans les schistes lustrés.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

B. — ANTIMOINE

1. Minerais. — L'antimoine a une assez grande analogie avec l'arsenic et forme des sulfo-antimoniures complexes (cuivres gris, boulangérite, bournonite, argents noirs et rouges). Le seul véritable minerai d'antimoine est la *stibine* (Sb^2S^3), analogue à l'orpiment (AS^2S^3), mais jouant un rôle beaucoup plus important. Les oxydes, *sénarmontite* (Sb^2O^3) et *valentinite* ou *exitèle* (Sb^2O^3) sont beaucoup plus rares. Encore plus exceptionnels sont le *kermès* (Sb^2OS^3) et la *nadorite* (oxychlorure de plomb et d'antimoine). Tous ces produits oxydés n'apparaissent que sur les affleurements des gisements antimonieux.

2. Usages. — L'antimoine est un des métaux les plus anciennement connus ; on en a trouvé dans les fouilles égyptiennes. Pendant toute l'antiquité, en particulier chez les Romains (et de nos jours encore en Orient), il fut employé dans la pharmacie et la parure ; les deux usages se sont du reste conservés jusqu'à notre époque..

En *pharmacie*, les médicaments à base d'antimoine, après avoir été très en faveur au Moyen Age, furent prohibés pendant longtemps (de 1566 à 1637). Actuellement, ils ont retrouvé une certaine vogue (kermès, émétique, beurre d'antimoine, antimoniate de quinine, etc..).

Dans la *parure*, le sulfure d'antimoine sert encore pour la composition de certains fards.

L'usage le plus important est la confection des *alliages*, auxquels l'antimoine donne de la dureté. Introduit en faible proportion dans le plomb, il permet le laminage en feuilles minces, à l'opposé de l'arsenic qui donne du « grenu ». A cet effet, il faut donc éviter les minerais d'antimoine qui contiennent de l'arsenic. Il entre pour 20 à 30 % dans la confection des caractères d'imprimerie, pour 12 à 15 %, avec un peu de bismuth, dans celle des stéréotypes. Il sert dans la fabrication des coussinets, des robinets, des piles, etc... Il permet la composition d'alliages fusibles, malléables ou anti-friction, dont on peut faire varier les propriétés, l'éclat, la couleur, la malléabilité (métal de la Reine, alliage d'Alger, de Réaumur, etc.) et où entre du Sb, Sn, Cu, Bi, etc...

L'industrie chimique fabrique le beurre d'antimoine, utilisé dans le bronzage du cuivre. L'industrie des *couleurs* l'emploie pour la fabrication de l'oxysulfure rouge (vermillon d'antimoine), du noir de fer, des jaunes de Naples, Pinard, Mérimée, du blanc d'antimoine qui remplace la céruse, etc..

3. Statistique. — La production est très variable d'une année à l'autre. Par moments, les emplois industriels provoquent un relèvement des cours, qui permet la réouverture d'un grand nombre de petites mines fermées. Il y a alors une surproduction qui entraîne la baisse et la disparition momentanée de ces petites mines qui revivent ainsi tous les 3 ou 4 ans. Pendant la guerre, la production fut très forte, par suite de la fabrication des enveloppes de cartouches par exemple.

La production mondiale d'antimoine oscille autour de 20 à 30.000 tonnes:

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

1913	21.000	tonnes
1916	80.000	»
1924	17.500	»
1926	35.000	»
1929	35.000	»

La principale productrice est la *Chine* : 22.000 tonnes en 1929 (11.000 tonnes en 1913, 43.000 tonnes en 1916, 13.000 tonnes en 1920, 18.000 tonnes en 1927, 20.000 tonnes en 1928).

Puis vient la *Bolivie* dont la production fut très forte pendant la guerre (15.000 tonnes en 1916), puis est tombée à 185 tonnes en 1922, pour remonter ensuite autour de 3.000 tonnes (3.600 en 1927, 3.000 en 1929). Le *Mexique* a retrouvé à peu près ses plus hautes productions du temps de guerre : 3.270 tonnes en 1918, 460 tonnes en 1922, 2.600 tonnes en 1926, 3.600 tonnes en 1928, 2.700 tonnes en 1929.

Les *anciens états austro-hongrois* ont une production croissante depuis la guerre : 240 tonnes en 1922, 1.240 tonnes en 1926, 3.000 tonnes en 1927, 1.900 tonnes en 1928.

La *France*, qui produisait jusqu'à 6.000 tonnes d'antimoine avant 1914, donnait encore 2.500 tonnes en 1916 qui, totalisés avec les 9.000 tonnes de l'Algérie, classaient notre pays au 3e rang des producteurs d'antimoine. Mais sa production a considérablement fléchi : avec l'Algérie, 1.400 tonnes en 1922, 2.100 tonnes en 1925, 900 tonnes en 1926, 1.500 tonnes en 1927, 1.250 tonnes en 1928, 1.400 tonnes en 1929.

Enfin viennent de plus faibles productions : l'*Asie Mineure* (400 tonnes), la *Yougoslavie* (150 à 300 tonnes). L'*Italie*, dont la production s'est élevée à plus de 4.000 tonnes en 1916, n'a plus fourni que 500 tonnes en 1927 et 290 tonnes en 1929. Le *Maroc espagnol* a, depuis peu, une production qui se monte à 180 tonnes en 1929. La production *australienne* a considérablement diminué (1.700 tonnes en 1916, 25 tonnes en 1929).

Il est à remarquer que la production des Etats-Unis est à peu près inexistante (30 tonnes en 1928).

4. Commerce. — Nous avons vu que les cours de l'antimoine sont très variables. Ils sont sujets à des dénivellations brusques dès qu'ils atteignent les cours-limites d'exploitation de groupes de mines déterminés.

Les *produits marchands* sont le *régule* (antimoine métallique) et *l'antimoine cru* (sulfure liquaté) obtenu par fusion pour éliminer la gangue quartzeuse. Les cours exprimés s'appliquent, tantôt à l'un, tantôt à l'autre.

On vend aussi des *minerais* : la stibine, qui renferme théoriquement 71 % d'antimoine et pratiquement 50 % au plus, et les oxydes. La valeur de ces minerais est très variable suivant la teneur. Au-dessus de 50 %, ils sont considérés comme de 1re qualité ; au-dessous de 20 %, ils sont difficilement vendables. La présence de l'arsenic, du plomb et du cuivre les déprécie beaucoup ; la pyrite de fer offre moins d'inconvénients. Le prix de l'unité métal augmente rapidement avec la teneur : avant la guerre, il était de 2 fr. 50 à 5 francs pour les minerais pauvres et de 10 francs pour les minerais à haute teneur. On se sert parfois de formules pour la vente des minerais.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Par exemple :

$$p = \frac{T}{100}\left(1 - \frac{1}{a}\right)(c - f),$$

p = prix de la tonne de minerais ;
T = teneur en centièmes constatée par voie sèche ;
c = cours du régule en francs par tonne (3.400 francs réduits environ en mars 1932) ;
f = frais de fusion et bénéfice du fondeur par tonne ;
$1/a$ = déchet de fabrication.
L'antimoine se trouvant souvent en poches, les bénéfices sont parfois considérables, mais très irréguliers.

5. Gisements. — Les véritables gisements sont ceux de *stibine* qui se présentent le plus souvent en *filons*, mais aussi en *gîtes de contact* entre calcaires et schistes, ou en *imprégnations* au voisinage de la surface (dans des calcaires, des grès...). La gangue est généralement quartzeuse. L'antimoine peut se rencontrer également avec l'or, avec le plomb, avec le cuivre (cuivre gris) et avec le mercure.

On connaît des types franchement primaires (gangue quartzeuse, avec pyrite, mispickel, quelquefois or) et des types franchement tertiaires (avec cinabre, réalgar et cuivre gris). Quant à l'association avec le plomb, elle peut se trouver aussi bien dans des gisements primaires que dans des gisements tertiaires.

I. Gites dans la chaine hercynienne. — *a*) Ils sont fréquemment associés à d'autres sulfures et forment des filons quartzeux irréguliers en relation avec la microgranulite. On y trouve du *quartz*, de la *stibine*, de la *pyrite de fer*, parfois du *mispickel*, un peu de *molybdénite* (MoS^2), auxquels il faut ajouter des produits d'altération superficielle : *sénarmontite*, *exitèle*, *kermès*. Ces filons antimonieux se signalent aux affleurements par leurs altérations jaunâtres. Ils se transforment souvent en filons plombifères, quand on s'éloigne des massifs de microgranulite, puis en filons où la galène est seule. L'étain et l'antimoine sont quelquefois voisins, mais rarement associés : les gîtes d'antimoine étant moins profonds et plus récents.

Ces gîtes sont *associés à des roches d'origine assez profonde*, intermédiaires entre les granulites et les microgranulites, dans des régions de plissements anciens : ainsi dans la Creuse, ils se rencontrent avec les microgranites. Dans bien des cas, ils sont encaissés dans les terrains carbonifères, par exemple dans le Dinantien du Massif Central.

La stibine est *disséminée très irrégulièrement*, par paquets, au milieu du quartz, un peu comme la cassitérite ; on n'observe pas le phénomène de rubanement parallèle aux épontes, ni de concrétionnement.

Massif Central. — Les gîtes y forment surtout une zone Nord-Sud, allant de Gannat à Brioude (Creuse, Allier, Puy-de-Dôme, Haute-Loire, Cantal). La principale région exploitée est le groupe de *Brioude* (Haute-Loire) et *Massiac* (Cantal). Tous ces gîtes du centre de la France sont au contact immédiat des microgranulites et des terrains primitifs ; il y a là une quantité de filons de stibine. Certaines exploitations ont été particu-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

lièrement riches, comme celle de *Mérinchal* (Creuse). Les microgranulites y ont un âge très bien déterminé : elles recoupent le dinantien et se trouvent en galets dans le Stéphanien. Tous ces gîtes sont donc bien de la fin du Dinantien ou du Stéphanien.

Au Sud, les gisements de *Freycenet* et de la *Licoulne* (Haute-Loire) présentent un bon type de filons de stibine compacte, ayant jusqu'à 40 centimètres de puissance et contenant 8 à 10 % d'antimoine, quelquefois même 25 % avant triage. Dans son ensemble, le filon est assez continu ; mais il est formé d'une série de lentilles de 20 à 25 centimètres d'épaisseur sur 5 à 6 mètres de longueur, dans l'intervalle desquelles il n'y a pas de minerais. A côté de filons antimonieux, il y a des types plombo-antimonieux et argentifères (boulangérite) et des types uniquement plombo-argentifères.

Dans l'*Ardèche* (*Charmes*), la stibine, d'âge certainement postérieur au Trias, a imprégné une dolomie triasique recouvrant le granite. Elle y forme des amas irréguliers accompagnés de silex brun et de barytine. Elle est sans intérêt industriel.

En *Westphalie*, il existe des gisements d'antimoine liés au Dinantien. La mine d'*Arnsberg*, sur le flanc d'un grand anticlinal disloqué, a l'allure d'un filon-couche, analogue aux imprégnations du Dinantien de la Creuse, pour lesquelles on a parfois soutenu l'origine sédimentaire ; le quartz antimonieux forme des lentilles qui se chevauchent au milieu des schistes et des grès. Association avec la pyrite et un peu de blende.

Dans le *Harz* et en *Bohême*, on trouve aussi des filons antimonieux primaires à remplissage complexe.

b) La stibine des gîtes quartzeux primaires est parfois *aurifère* et elle peut s'associer à du mispickel lui-même aurifère. Ces types de gisements sont peut-être plus anciens que les précédents.

A l'Est du *Massif Armoricain*, les mines de la *Lucette* (Mayenne) ont pris un grand développement à cause de la présence simultanée de la stibine et de l'or, l'association des deux métaux permettant une exploitation plus régulière et plus continue. Les filons sont assez réguliers, presque verticaux, au milieu des quartzites du Silurien supérieur. L'or se trouve aussi bien dans les pyrites (35 gr. à la tonne) et le quartz (6 gr. à la tonne) que dans les stibines (25 à 30 gr. à la tonne).

Au *Portugal*, les gisements du *bassin du Douro* (Vallongo, Gondomar, etc.) ont des caractères analogues : ils sont aussi aurifères. Les filons quartzeux suivent une cuvette allongée de terrains siluriens et houillers.

Au *Transvaal*, il existe quelques beaux filons de stibine aurifère ayant présenté, dans leur partie haute, des cristaux d'or natif.

L'*Australie* possède, dans la *Nouvelle-Galles du Sud*, le *Queensland* et la province de *Victoria*, des filons d'antimoine dont plusieurs sont aurifères.

II. GISEMENTS TERTIAIRES. — Ils se trouvent dans des régions disloquées par des plissements de l'époque tertiaire ; l'antimoine y est associé au groupe B.P.G., quelquefois au cuivre, ou au mercure.

a) L'*association du cuivre et de l'antimoine* donne des sulfo-antimoniures (cuivre gris) qui semblent être une forme superficielle dans les filons cu-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

prifères, souvent avec la sidérose et la barytine. En profondeur, on n'a plus que de la chalcopyrite et de la pyrite cuivreuse.

Cette sorte de gîtes antimonieux se rencontre en *Algérie* (*Mouzaia*, *Petite Kabylie*), en *Bosnie*, en *Macédoine*, au *Yunnan*, dans l'Ouest des *Etats-Unis* (*Sierra Névada*), au *Pérou*.

b) L'*association du mercure et de l'antimoine* est un type récent, caractéristique de certains gisements qui se sont formés dans la zone superficielle de l'écorce terrestre. Avec la stibine et le cinabre, on y trouve parfois du *réalgar* et de l'*orpiment*, de la *pyrite*, des *hydrocarbures* et, accessoirement, du *cuivre gris*. La gangue est quartzeuse. On a quelquefois signalé à tort du cinabre, là où n'existait que du kermès. On rencontre de tels gisements dans toute la zone circumméditerranéenne, par exemple en *Algérie*, en *Toscane*, en *Corse*, dans la *Sierra Névada espagnole* et aussi en *Californie* et au *Mexique*.

En *Toscane*, les deux métaux connexes, antimoine et mercure, forment des gîtes d'une réelle importance industrielle en relation avec des éruptions trachytiques et andésitiques tertiaires. Ainsi la région des trachytes du *Monte-Amiata* présente des cassures Nord-Sud très minéralisées par ces deux métaux. La mine *Jano* a des filons de stibine dans les dolomies liasiques ; mais, à côté, on trouve des imprégnations jusque dans le Tertiaire.

En *Algérie*, les gisements du *Djebel-Haminat* (Constantine) traversent le Néocomien, dont le calcaire a subi une imprégnation par petites veinules ayant l'allure de filons-couches, si bien que Coquand les a décrits comme gîtes d'origine sédimentaire, où l'oxyde d'antimoine aurait été contemporain du dépôt et aurait joué le rôle de l'oxyde de fer dans d'autres gisements. Il s'agit, en réalité, de produits d'altérations superficielles (*valentinite*, *sénarmontite* et *kermès*) dont on a exploité quelques petits dépôts. La stibine est bien cristallisée.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE IX

BISMUTH ET MOLYBDÈNE

Le bismuth et le molybdène tiennent à la fois des métalloïdes et des métaux. La nature de leurs gisements les rattache au groupe de l'étain. et leur attribue un rôle qui rappelle souvent celui de l'arsenic ou de l'antimoine.

A. — BISMUTH

1. Usages. — Le bismuth étant *très fusible*, cette propriété est utilisée dans la fabrication de certains *alliages*, servant à déterminer la température des vapeurs et employés également pour le clichage des médailles, pour la fabrication des soupapes de sûreté, etc... On l'utilise dans la construction des piles thermo-électriques.

Il a quelques applications en *médecine* (sous-nitrate) et dans la fabrication des *fards* (blanc de perle).

2. Statistique. — Tous ces usages sont assez restreints et la production est faible. Jusque vers 1870, les mines de *Saxe* produisaient la presque totalité du bismuth consommé dans le monde, avec des cours variant entre 10 et 80 francs le kilog. Depuis 1870 environ, la *Bolivie*, le *Mexique*, les *Etats-Unis*, l'*Espagne* et l'*Australie* ont pris une place prépondérante dans la production.

A l'heure actuelle, les principaux producteurs sont : la *Bolivie* (224 tonnes de métal en 1926 ; 150 en 1929) et les *Etats-Unis* (136 tonnes en 1924). Puis viennent les productions du *Japon* (50 tonnes en 1929), du *Pérou* (31 tonnes en 1929), de l'*Espagne* (25 tonnes environ), et de la *Tchécoslovaquie* (20 tonnes environ), enfin de petites productions de l'*Australie*, du *Canada* (6 tonnes en 1930), de l'*Argentine* qui est tombée à quelques tonnes et de l'*Allemagne*.

Les minerais tenant moins de 10 % trouvent difficilement acheteur ; la moyenne des minerais marchands est de 20 à 25 ; teneur allant parfois jusqu'à 50 %.

3. Minerais. — Le *bismuth natif* est plus fréquent que l'arsenic natif. On le rencontre surtout aux affleurements ; en profondeur, il est associé à l'arsenic et aux éléments de la famille du soufre (S, Se, Te).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Le minerai principal est la *bismuthine* (Bi^2S^3), gris-blanc, en baguettes, caractérisée par sa grande fusibilité ; elle est associée souvent au cuivre, au plomb, à l'argent, au sélénium, au tellure.

Parmi les oxydes de bismuth, le bismuth oxydé ou *bismuthocre* (Bi^2O^3) est l'analogue de la sénarmontite et de la valentinite (Sb^2O^3).

Des minerais complexes sont formés essentiellement de sulfo-bismuthures comparables aux sulfo-antimoniures. Leur véritable nature est d'ailleurs masquée par la terminologie chimique qui considère le bismuth comme un métal, tandis qu'il paraît jouer le rôle d'un métalloïde.

Les *carbonates de bismuth* se rencontrent aux affleurements des gîtes.

4. Gisements. — Le bismuth existe en association avec l'étain et le cuivre, accessoirement avec le tungstène et le molybdène ; parfois aussi avec le cobalt, l'uranium ou l'or.

I. Gites filoniens en association avec l'étain. — Quand les filons de cette nature perdent leur caractère stannifère et se chargent en cuivre, le bismuth apparaît.

Bolivie. — On rencontre à la fois l'*étain*, le *cuivre*, l'*or* et le *bismuth*. La région bismuthifère de Bolivie est une région métallifère, extrêmement riche ; mais elle est située à une altitude très élevée (5.000 à 6.000 mètres) et d'accès assez difficile. Les centres principaux sont *Chorolque* (5.600 mètres) et *Tazna* (5.100 mètres). On a d'abord exploité pour l'or (celui-ci a été abandonné ; il tend à être repris sous une autre forme), puis pour l'argent, puis pour le cuivre argentifère et l'étain dont l'extraction a donné lieu à de grandes installations. Enfin on a procédé à l'extraction du bismuth, contenu dans des minerais à 25-30 %.

Les filons de Tazna ont une puissance qui atteint 1 mètre. Ils renferment de la cassitérite (SnO^2), de la chalcopyrite et de la bismuthine (Bi^2S^3). Les produits d'altération en affleurements sont particulièrement riches et renferment des oxydes et carbonates.

Argentine. — Gisements analogues.

Australie. — Le bismuth existe en divers points du *Queensland*, de la *Nouvelle-Galles du Sud* et de la *Tasmanie* qui contiennent en même temps des gisements d'étain et de tungstène. Dans la Nouvelle-Galles-du-Sud, on l'exploite, tantôt dans des alluvions stannifères, tantôt en filons. Il est accompagné de molybdène et d'or, ou de cuivre.

Angleterre. — On extrait un peu de bismuthine des gisements stannocuprifères de *Cornwall*.

France. — Le gisement de *Meymac* (Corrèze), unique en France et sans importance industrielle, est en relation étroite avec les gisements stannifères. Dans les grandes masses de granulite de la région, il y a de toutes parts des filons quartzeux stannifères ; où l'on trouve parfois du tungstène et du bismuth.

A Meymac, il existe en surface une forte proportion de bismuth, sous forme d'oxydes, de carbonates, d'hydrocarbonates dont l'extraction est facile et passant en profondeur au bismuth natif et à la bismuthine. On y rencontre aussi en surface de grandes masses de scheelite (WO^4Ca) qui passe en profondeur au wolfram [(Mn, Fe) WO^4].

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Enfin il s'y trouve de la cassitérite finement disséminée, de la molybdénite et quelques minéraux plombeux.

II. ASSOCIATION DU BISMUTH ET DE L'OR — L'association d'or natif avec la bismuthine et les sulfo-séléniures ou sulfo-tellurures de bismuth est assez fréquente. Elle doit être comparée à l'association des sulfo-arséniures, sulfo-tellurures, sulfo-antimoniures, avec le mispickel ou la stibine.

Cette association a un certain intérêt pratique; car la présence d'un sulfo-séléniure de bismuth, dentritiforme (tricotis) et blanc d'argent, peut constituer un indice intéressant dans la prospection des mines d'or et sert même à déceler l'existence de certains minerais d'or (Amas de *Fahlun* en *Suède*)

En *Norvège*, à *Bléka*, les schistes anciens sont recoupés par des filons contenant un peu de bismuthine et d'or natif avec du quartz, des pyrites de fer et de cuivre et de la galène accessoire Ces filons, d'un type voisin des filons stannifères, sont sans importance industrielle.

III. GISEMENTS COMPLEXES EN ASSOCIATION AVEC LE COBALT. — Outre le plomb et le bismuth, ces gisements comprennent Cu, Ag, Co, quelquefois Ur. Ils ont perdu de leur importance pratique ; car le bismuth n'y joue qu'un rôle très secondaire. On les rencontre en *Saxe* (*Schneeberg*, *Annaberg*), en *Transylvanie*, au *Mexique*, au *Colorado*.

B. — MOLYBDÈNE

1. Usages — Le molybdène a été longtemps à peu près inutilisé. Il a servi ensuite dans l'industrie des *matières colorantes*, dans la fabrication de certains *verres et porcelaines*. Depuis 25 ou 30 ans, il a un autre usage qui, par sa nature même, devait prendre une extension considérable ; il sert, en effet, à la fabrication d'*aciers spéciaux* élastiques, ductiles, résistant à la rupture. On les utilise comme aciers-rapides, aciers à outils, aciers à aimants. Les alliages ternaires et quaternaires avec le chrome et le nickel donnent des aciers particulièrement résistants qu'on emploie dans la fabrication des tôles de chaudières, des matériaux de construction, des blindages, des projectiles, des avions et des autos.

2. Statistique. — La majeure partie de la production mondiale de molybdène (métal)est fournie par les *Etats-Unis*.

En 1930, sur une production mondiale croissante de près de 2 000 tonnes (800 tonnes en 1918, 12 tonnes en 1922, 626 tonnes en 1925, 1062 tonnes en 1927, 1986 tonnes en 1929, 1850 tonnes en 1930), les *Etats-Unis* ont donné 1696 tonnes de métal (400 tonnes en 1918, rien en 1922, 975 tonnes en 1927, 1825 tonnes en 1929), la *Norvège*, 154 tonnes (120 tonnes en 1918, rien en 1922, 80 tonnes en 1927).

De petites productions viennent en outre de l'Australie et du Canada. L'*Australie*, qui produisait 100 tonnes en 1918, est tombée à 10 tonnes en 1922, puis est remontée à 30 tonnes environ ; en 1928, elle n'a guère fourni qu'une tonne. Le *Canada*, qui donnait plus de 100 tonnes en 1918, n'a plus qu'une production de 5 à 7 tonnes (6 tonnes en 1929).

Certains pays n'ont rien produit dans ces dernières années : la *Suède*

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

(38 tonnes en 1918, 3 tonnes en 1926), l'*Espagne* (7 tonnes en 1918, 30 tonnes en 1920), le *Japon* et la *Corée* (10 tonnes en 1918, 20 tonnes en 1926).

3. Gisements. — Il y a une certaine difficulté à se procurer du molybdène qui se présente toujours en petites quantités. Ce métal a deux minerais pratiques : la *molybdénite* (MoS^2) et la *wulfénite* ou plomb jaune (molybdate de plomb).

I. GISEMENTS DE MOLYBDÉNITE. — On ne connaissait tout d'abord que les gisements de molybdénite (MoS^2) en filons de quartz, dans des conditions analogues à celles où l'on trouve la stibine, la cassitérite, le tungstène, la bismuthine, avec tendance à l'association avec la chalcopyrite. Ce type de gisements (veines de remplissage irrégulières de chalcopyrite avec un peu de molybdénite) a été exploité pendant longtemps. Tels sont les gîtes des *Vosges* (*Château-Lambert*), de la *Norvège* (*Lofoten*) et de la *Suède*.

En *Norvège*, les gisements, situés près de *Svolvaer* (îles *Lofoten*), comprennent des filons assez développés de molybdénite et de pyrite cuivreuse dans des schistes siluriens métamorphiques, avec allures de filons-couches, si irréguliers que l'exploitation a dû être arrêtée.

En *Suède*, les gisements de l'archipel de *Westerwick* (Sud-Est de la Suède) sont constitués par de la molybdénite dans des filons qui contiennent du quartz, du feldspath, de la pyrite cuivreuse ; ce sont, en réalité, des filons de granulite et de pegmatite, où certains sulfures s'isolent en mouches très fines au milieu de la roche. Les paquets de molybdénite n'atteignent que rarement des poids de 1 à 2 kilogs. En 1880, année particulièrement fructueuse, on a extrait, pendant l'été, 600 kilogs de minerai.

II. GISEMENTS DE WULFÉNITE. — Puis on a découvert un type différent, résultant d'*altérations superficielles* donnant lieu à des molybdates de plomb, sur les affleurements des filons plombeux, où on les trouve associés à des minerais divers, pyromorphite, mimétèse, anglésite, cérusite, etc... Dans ces minéraux, le phosphore provient des traces contenues dans les roches encaissantes ; l'arsenic des mispickels. Quant au molybdène, il semble provenir de très minces aiguilles de molybdénite intercalées dans les clivages de la galène. Cette question n'a pu être élucidée par l'examen microscopique ; on en est réduit aux essais chimiques qui portent sur de trop faibles proportions pour donner des indications bien nettes.

La wulfénite donne de fortes quantités de molybdène aux *Etats-Unis*. Elle est souvent associée au vanadium, à l'état de chlorovanadates (vanadinites) qu'on rencontre assez abondamment au *Mexique*.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE X

SILICIUM

Le silicium intervient dans la composition d'une foule de minéraux : soit sous forme de *silice*, soit sous forme de *silicates*.

La *silice* (SiO^2) forme l'élément essentiel des sables quartzeux, utilisés pour la fabrication du verre, du silex, du cristal de roche, des calcédoines (cornaline, jaspe, onyx), des meulières, des pierres à fusil, opales, tripoli.

Les *silicates* comprennent les différents feldspaths : pierre de lune (orthose), pierre d'amazone (microline), pierre de soleil ou aventurine (oligoclase), labrador, et leurs produits de décompositions (kaolins, etc...), ainsi que le lapis-lazuli, les micas, l'amiante, les ardoises, les gemmes (topaze, émeraude, grenat, péridot, etc...)

A. — SILICE

1. Sables de verrerie. — Dans la composition des verres blancs et des glaces intervient une proportion de silice telle que la quantité d'oxygène qu'ils renferment représente 4 fois l'oxygène des bases et des alcalis. Dans certains verres (verre de Bohême, etc...) plus fusibles et moins résistants, ce rapport est égal à 3 ; il est encore plus faible dans les verres à bouteilles, où on augmente la proportion de chaux et où on diminue celle de silice.

Les sables communs n'ont aucune valeur. Au contraire, les sables quartzeux très blancs et très fins ont un certain prix ; ils doivent pour cela être absolument exempts de fer.

Certains gisements, tels que les *sables de Fontainebleau* et de *Nemours*, ont à ce sujet un véritable privilège et donnent des produits que l'on peut exporter au loin jusqu'aux Etats-Unis, malgré leur valeur relativement minime.

2. Cristal de roche. — Le cristal de roche est utilisé en optique ; il l'était autrefois aussi en orfèvrerie. Si les petits échantillons sont fréquents, les individus d'une certaine dimension sont relativement rares. Les plus beaux se rencontrent surtout dans les pegmatites. et dans les alluvions qui en proviennent, à *Madagascar* et au *Brésil*. Ils peuvent atteindre 1 à 2 mètres de périphérie et peser 300 à 400 kilogs. Les échantillons du *Saint-Gothard*, du *Tyrol*, de l'*Oisans* vont aux collections de miné-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

ralogie et sont rarement utilisés dans l'industrie. Les *cailloux du Rhin*, utilisés parfois en joaillerie pour des bijoux de qualité inférieure, sont constitués par du quartz roulé. L'*améthyste* est une variété violette de quartz (pouvant devenir verte par le chauffage), qui doit probablement sa coloration à du manganèse.

3. Quartz enfumé. — On a remarqué que le quartz hyalin, sous l'influence du radium, se transformait en quartz enfumé ; on a donc émis l'hypothèse que les grottes des *Alpes*, où l'on a trouvé jusqu'à 20 tonnes de quartz enfumé, avaient été parcourues par des eaux radioactives, lesquelles auraient agi sur le quartz primitivement hyalin.

4. Calcédoines: — Parmi leurs diverses variétés, on peut citer les *cornalines* et les *agates* utilisées comme pierres d'ornement ; elles se trouvent presque toujours dans les géodes de roches volcaniques (trapps, mélaphyres, basaltes). Elles viennent principalement de l'*Inde* (région de *Bombay*), où on exploite un conglomérat ancien, dans lequel ces agates, résultant de la décomposition des trapps, ont été concentrées et cimentées. On les désagrège et on les sépare d'après leur couleur. Celle-ci peut être modifiée par la cuisson qui est effectuée dans de petits pots en présence de fumier que l'on fait brûler lentement. On peut, du reste, colorer artificiellement les agates en les plongeant dans un bain de teinture. C'est ainsi que l'on obtient les agates bleues. Elles sont taillées en Suisse et dans le Palatinat. De grandes quantités d'agates existent aux *îles Kerguélen*.

5. Meulière. — Roche siliceuse criblée de cavités, légère, elle est employée dans la construction et, dans certains cas, pour la fabrication des meules. Elle vient de la silicification de calcaires, qui a porté surtout sur les diaclases de la roche initiale et qui a été suivie d'une décalcification de la roche ainsi silicifiée. Elle se présente en blocs au milieu d'une argile rouge de décalcification. Dans les environs de Paris, on en trouve deux niveaux importants (*Brie* et *Beauce*).

6. Pierres à aiguiser. — Les *pierres à aiguiser*, *pierres à rasoirs* ou *novaculites*, *pierres à huile*, utilisées pour aiguiser et frotter, sont 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.

7. Opale. — C'est de la silice hydratée. Elle est recherchée en bijouterie quand elle présente certaines qualités et en particulier certains reflets. L'opale de *Hongrie* a une grande supériorité. Les opales du *Mexique* sont généralement de moindre qualité. Cependant quelques-unes sont recherchées (opales de feu ou opales chatoyantes).

On les rencontre dans des druses de roches trachytiques, où s'est faite une concentration de la silice. Parfois les druses sont remplies de calcédoine et le bain liquide primitif, chargé de principes salins, a été emprisonné dans des inclusions.

Récemment on a découvert en *Nouvelle-Zélande* de belles opales bleu

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

vert sur fond noir, formées par des phénomènes de silicification sur des bois ou des ossements.

8. Tripoli et terres d'infusoires. — On désigne sous le nom de *tripoli*, dans le commerce, des produits très variés, rouges ou jaunes, utilisés pour le polissage. Les véritables tripolis sont composés d'opale pulvérulente : ils ne se distinguent des terres d'infusoires que par leur emploi. Le tripoli de *Menat* (Puy-de-Dôme), qui ne mérite pas son nom minéralogique, est obtenu par la calcination à l'air libre de schistes très siliceux chargés d'hydrocarbures.

Les *terres d'infusoires* sont formées par des carapaces siliceuses de diatomées. Très légères et très poreuses, elles ont plus de valeur que les tripolis. On en fabriquait des briques dans l'antiquité, chez les Grecs et les Byzantins : c'est avec ces briques que fut édifiée la coupole de Sainte-Sophie à Constantinople. On s'en sert aussi pour absorber la nitroglycérine dans la fabrication de la dynamite. Mais la terre employée doit être très pure en alumine (argile) et oxyde de fer. Le grand centre de production se trouve dans la *lande de Lünebourg* (Nord du Hanovre). On en rencontre dans le *Massif Central* (Cantal, randannite de Ceyssat). Toutes ces terres, marines ou lacustres, se sont déposées depuis le Miocène supérieur.

B. — SILICATES

1. Mica. — Il a des applications industrielles. On l'emploie sous deux états :

1° *à l'état pulvérulent*, à divers usages, l'argenture et le satinage des papiers de tenture par exemple. Sa valeur est alors à peu près nulle, car on utilise surtout des déchets de mica. Agglomérés, ces déchets sont employés pour fabriquer la micanite, remplaçant le mica naturel en feuilles.

2° *en grandes feuilles* dont la superficie peut être de plusieurs mètres carrés. L'usage de ces feuilles tient à la réunion des qualités de transparence, de flexibilité, d'incombustibilité et d'infusibilité du mica, qui est en outre peu conducteur et inaltérable au feu et à l'eau. On les emploie par exemple, dans les poêles, dans les fumivores, dans les écrans, dans certains fours métallurgiques, en électricité.

Le mica en grandes feuilles est extrait de *pegmatites*.

Les sources principales sont les *Etats-Unis*, l'*Inde anglaise*, le *Canada*, l'*Afrique du Sud*, la *Russie* et *Madagascar* (1). Au Canada, les exploitations de mica blanc (muscovite) se trouvent dans la province de Québec et d'Ottawa. On a rencontré des cristaux de mica ayant 1 mètre de côté pesant 140 kilogrammes et valant une vingtaine de mille francs. L'exploitation consiste à détacher, sans les briser, les cristaux de mica engagés dans des veines de pegmatite. Le prix est plus que proportionnel aux

(1) **Mica :** *Etats-Unis* : 7.800 tonnes en 1928, 6.600 tonnes en 1929 ; *Inde anglaise* : 4.850 tonnes en 1928, 5.900 tonnes en 1929 ; *Canada* : 3.700 tonnes en 1929 ; *Union Sud-Africaine et Rhodésia* : 3.600 tonnes en 1928, 1.600 tonnes en 1929 ; *Russie d'Europe et d'Asie* : 1.500 tonnes en 1928 ; *Madagascar* : 861 tonnes en 1928, 380 tonnes en 1929.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

dimensions des cristaux. Un cristal de 5 centimètres de côté valait avant la guerre environ 12 francs-or, alors qu'un cristal de 15 centimètres valait environ 350 à 400 francs. Au cours de l'année 1929, les plaques de mica n° 1 (rectangle de 24 à 36 pouces carrés), provenant de Madagascar, ont été cotées 110 francs réduits le kilog. Dans l'Inde, en particulier au Bengale, qui fournit le quart de la production mondiale, le mica existe dans des veines de granulite au milieu des gneiss ; on met à nu la couche où se trouve le mica, dont on s'efforce d'enlever les plus grandes feuilles possibles.

2. Amiante ou asbeste: — C'est un textile minéral, fibreux, incombustible, inattaquable aux acides.

On en distingue deux qualités industrielles :

1° l'amiante en *fibres courtes*, employée pour l'obturation des joints dans les machines, les culasses des canons, comme isolant en électricité, pour le filtrage des liqueurs acides, etc... Cette amiante de qualité inférieure est fournie par la *trémolite* (amphibole) du *Val Trémola* (Saint-Gothard), du *Val d' Aoste*, de l'*Oural*, de l'*Inde* ;

2° l'amiante en *fibres allongées* qu'on traite comme un textile et qui sert à la confection de cordages, d'étoffes, de fils, de mèches, de papiers incombustibles.

Le *Canada* en fournit des quantités importantes (1) ; elle s'y rencontre sous forme de *chrysotile* (variété de serpentine), fin et soyeux, enchâssé dans la serpentine. Les variations de prix et de productions y sont considérables. On en rencontre aussi dans l'*Afrique du Sud*. Toutes ces amiantes sont mêlées à des roches et nécessitent, comme le chanvre, un broyage préalable.

3. Ardoises. — L'ardoise est un schiste argileux, dur, fissile, noir, rouge ou bleu, peu altérable à l'air et à l'humidité, facile à réduire en feuilles minces. Elle est employée à la couverture des toits depuis le x^e^ siècle. Sa consommation s'est développée progressivement avec le développement des moyens de communication. Les ardoises de grandes dimensions, d'une valeur relativement plus élevée que les ardoises de toiture, sont employées comme tables de billards et de cheminées, tableaux noirs, mangeoires d'écuries, isolateurs électriques (tableaux de distribution), etc...

Les qualités exigées d'un schiste pour être une ardoise sont :

1° de pouvoir être réduit en feuilles minces. Diverses roches peuvent l'être ; mais elles sont généralement d'un grand poids, ce qui est un inconvénient sérieux, sauf dans les pays de grand vent comme la Suisse ;

2° d'être inaltérable. L'altérabilité générale de l'ardoise est une conséquence de sa porosité. Elle est loin d'être négligeable, ainsi qu'en témoigne la décomposition qu'on observe à l'affleurement des veines d'ardoise et elle se fait généralement en 50 à 60 ans. Elle varie d'ailleurs avec la provenance : l'ardoise de l'Ardenne par exemple a une durée plus longue que

(1) **Asbeste** : *Canada* : plus de 200.000 tonnes (1930) ; *Russie* : 46.000 tonnes (1930) ; *Rhodésia* : 34.000 tonnes (1930) ; *Union Sud-Africaine* : 30.000 tonnes (1929), 18.000 tonnes (1930) ; *Chypre* : 13.000 tonnes (1929), 6.500 tonnes (1930) ; *Etats-Unis* : 3.300 tonnes (1930) ; *Italie* : 2.850 tonnes (1929).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

l'ardoise d'Angers. Il y a, en outre, une altérabilité locale due à la présence de la pyrite de fer. En effet, celle-ci se transforme en sulfate et laisse un trou par lequel l'eau pénètre. Un mode d'essai très simple d'une ardoise consiste à la plonger dans l'eau jusqu'au tiers de sa hauteur ; l'ardoise est de bonne qualité si, au bout de 24 heures, la partie supérieure reste sèche.

GISEMENTS. — Les ardoises se rencontrent dans les terrains où le dynamo-métamorphisme a affecté l'argile, dans le Cambrien et le Silurien notamment. Elles forment des lentilles, des sortes de filons verticaux, au milieu de schistes.

Les ardoises donnent naissance à une industrie importante localisée en quelques points : *Pays de Galles*, *France* (*Angers*, *Bretagne*, *Ardennes*, *Corrèze*, *Pyrénées*), *Suisse* (les ardoises, dans la région des *Grisons*, sont *éocènes*.)

Ardennes. — Les ardoises de l'Ardenne se trouvent dans les régions de *Fumay*, de *Rimogne* et de *Deville* (étage Devillien). Elles dépendent des différentes zones schisteuses constituant le Cambrien de l'Ardenne. Ce sont les plus anciennes de France. Leur extraction en 1929 est évaluée à 39.000 tonnes.

Le centre principal d'exploitation est Fumay. Le banc le plus important a une puissance maxima de 8 mètres ; son inclinaison, très variable, est, en moyenne, de 25° : ce qui crée des difficultés d'exploitation. L'ardoise est tachée de rouge, de violet ou de vert.

Angers. — Les principales exploitations françaises d'ardoises se trouvent dans la région d'Angers ; elles appartiennent au Silurien ; elles forment des bancs très redressés entre les schistes à graptolites à leur base et les assises de minerai de fer.

On exploite là des bancs à peu près verticaux que les ouvriers appellent des veines ; la puissance de ces veines peut atteindre 100 mètres. Ces ardoises constituent un accident pétrographique dans les schistes, au milieu desquels elles ont l'allure de lentilles. A la différence de l'Ardenne, il n'existe pas à Angers de grès intercalés entre les bancs d'ardoise.

La principale exploitation, *Trélazé*, date du Moyen-Age, époque à laquelle on traitait des affleurements. Après quoi, on a procédé à l'exploitation souterraine dans de grandes chambres de 80 à 100 mètres de longueur, au milieu desquelles se trouve le puits d'extraction.

Mais la présence de plans de cassure peut rendre le travail dangereux, ainsi que le démontrent les éboulements survenus autrefois à Trélazé. Aussi emploie-t-on maintenant une méthode d'exploitation par tranches sucessives avec remblai. On a alors une série de petits accidents, au lieu d'un seul grand ; le résultat total est meilleur. On cherche à mettre à nu le banc sur une grande surface, de façon à obtenir de larges dalles entre deux cassures.

Les produits extraits sont travaillés sur le carreau de l'ardoisière, clivés, fendus et triés en grandes ardoises et petites ardoises (9.000 à 10.000 ouvriers).

La production du bassin d'Angers est d'environ 133.000 tonnes d'ardoises (1929) dont les 3/4 au moins, peut-être les 7/8, sont exportés. Le prix de l'ardoise avait sensiblement baissé il y a quelques années. Ce produit a subi,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en effet, une certaine défaveur et a été concurrencé par la tuile, par le zinc et par la tôle ondulée pour la couverture des usines. Le prix de vente était passé de 30 à 20 francs le mille avant la guerre. En 1932, ce prix varie par mille entre 300 et 430 francs réduits selon la qualité.

Pays de Galles. — L'extraction y atteint 500.000 tonnes par an et occupe 14 à 15.000 ouvriers. Les ardoises se rencontrent dans le Cambrien inférieur (Penrhyn ; 3.000 ouvriers) et dans le Silurien, niveau correspondant à celui d'Angers (*Llandeilo, Festiniog*).

4. Feldspaths et argiles. — Le *feldspath*, très fréquent dans la nature n'a de valeur que s'il atteint de grandes dimensions. On l'emploie en céramique pour les couvertes. Il n'a qu'une faible utilisation comme pierre d'ornementation. Les plus beaux cristaux de feldspath viennent des *pegmatites* (*Ceylan, Norvège, Labrador*). La *leucite*, qui est voisine des feldspaths et renferme une forte proportion de potasse (22 %), a été utilisée comme source de potassium dans la production de l'alun ; elle est très abondante dans les laves du Vésuve et de la Campagne romaine.

Les feldspaths sont des silicates d'alumine et d'une autre base : K, Na ou Ca ; ils se décomposent et donnent des *argiles* qui sont des silicates d'alumine hydratés, à composition chimique variable. Lorsqu'on étudie leur température de déshydratation, on arrive à en déterminer 5 groupes. Le plus important est celui des *halloysites* qui comprend les argiles sédimentaires et une grande partie des argiles chimiques. Le *kaolin* est fort peu différent des halloysites et ne s'en distingue que par la quantité de chaleur dégagée à 100°. Les autres groupes, l'*allophane*, la *pyrophyllite*, la *montmorillonite*, sont sans intérêt pratique.

Toutes les argiles proviennent, en dernière analyse, de la décomposition des feldspaths avec intermédiaires plus ou moins compliqués : décomposition qui a pu, soit se produire sur place, soit être accompagnée d'un transport et d'une concentration sédimentaire. C'est, en somme, le résidu de la décomposition chimique de roches quelconques. Cependant, dans certains cas, cette décomposition peut donner naissance à des bauxites ou à des latérites (voir plus loin au chapitre aluminium).

Les argiles sédimentaires se sont déposées dans l'eau, avec plus ou moins de lenteur, et on trouve tous les passages de l'argile pure à l'argile sableuse ou calcaire. L'argile est utilisée sur place pour la fabrication des briques, des tuiles, des poteries ou pour l'épuration des pétroles.

5. Kaolin. — C'est l'élément essentiel de la porcelaine. On l'employait depuis longtemps en *Chine*, avant qu'un missionnaire ne le retrouvât en Europe, et, au 18e siècle, n'introduisit cette industrie de la porcelaine en *Saxe*. Puis on découvrit les gisements de *Saint-Yrieix* et on édifia la manufacture de *Sèvres* en 1756. La production du kaolin a été longtemps monopolisée par la région de Saint-Yrieix. Les kaolins anglais prirent ensuite une importance croissante. Le prix du kaolin de Saint-Yrieix atteignait avant la guerre 120 francs la tonne ; les kaolins anglais de deuxième qualité ne valaient guère que 60 à 70 francs. En 1932, un kaolin moyen vaut de 450 à 520 francs réduits la tonne.

Le kaolin est le résultat constant de la décomposition du feldspath des

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

roches éruptives, surtout des pegmatites. Sa formation a fait autrefois l'objet de théories basées sur des expériences de laboratoire à l'aide de réactions chimiques rapides sur des liqueurs concentrées, bien différentes des opérations naturelles réelles, qui se passent lentement et ont lieu sur des liqueurs très diluées, On avait conclu du résultat de ces essais à une action profonde d'origine filonienne ; mais l'observation n'a pas confirmé cette hypothèse. Il n'est plus contestable que le kaolin est toujours d'origine superficielle, l'altération pouvant se prolonger plus ou moins profondément suivant la position du niveau hydrostatique. En *Limousin*, le niveau est peu profond et les carrières atteignent vite la roche inaltérée. En *Bourbonnais*, la profondeur est un peu plus grande : environ 60 mètres. Dans les filons argentifères du *Broken-Hill*, l'altération descend beaucoup plus bas et atteint 200 à 300 mètres.

Le facteur essentiel de cette altération est l'eau chargée d'acide carbonique. Les feldspaths du granite subissent une kaolinisation très rapide donnant naissance à l'arène granitique (1). La vitesse du phénomène est beaucoup augmentée par l'intervention de chlorures : le voisinage de la mer est, par suite, une condition favorable à la transformation. Dans les carrières de kaolin, on observe que l'altération suit toujours les filons de quartz et ce fait s'explique aisément ; le filon a en effet joué le rôle de drain pour les eaux (2). Les éléments métalliques du filon (pyrite, etc...) sont de plus intervenus pour augmenter l'altération, surtout lorsque des phénomènes de sulfatation (production d'acide sulfurique qui facilite l'attaque), de chloruration ou de fluoruration ont eu lieu, comme c'est le cas dans les filons d'étain. Ces phénomènes s'accompagnent parfois d'une cémentation (kaolins argentifères d'Australie).

Les grandes accumulations de kaolin ont évidemment pris naissance dans les grands massifs de roches à feldspaths, c'est-à-dire surtout dans les granulites et les pegmatites. Les gisements les plus importants d'Europe sont en *Cornwall* anglais ; il en existe aussi dans le *Massif Central français* :

Bourbonnais. — Les gisements de kaolin se rencontrent dans un massif (*Les Colettes*, Allier) de granulite à filons de quartz, isolé au milieu de micaschistes. Le long des filons quartzeux, le feldspath a été transformé en kaolin. La décomposition en kaolin s'est faite en laissant à la granulite sa structure primitive. Il n'y a eu aucune espèce de transport. Il est possible que d'autres influences que celle de l'eau expliquent la décomposition : le fluor a pu intervenir, car on trouve dans le gisement de la fluorine.

L'exploitation se fait par une série de carrières à ciel ouvert de 50 ou 60 mètres. Elles fournissent toujours une assez grande quantité d'eau que l'on fait arriver sur les matériaux abattus et qui s'écoule dans des rigoles où se fait un brassage. Le quartz reste sur place ; l'argile et le mica sont entraînés et subissent une série de décantations ; on les tamise pour enlever le mica et on confectionne des pains de kaolin que l'on fait sécher.

(1) C'est par suite de ce processus que des blocs de granite s'isolent et donnent des boules arrondies, déterminant des paysages caractéristiques (chaos granitiques).

(2) Le fait est si connu que, dans certains pays (Cévennes, etc.), on se procure de l'eau en poussant des galeries jusqu'aux filons de quartz.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Ce kaolin tient toujours un peu de quartz, de mica et quelques traces de cassitérite dont la présence lui enlève de la valeur.

Limousin (Saint-Yrieix). — C'est une région de terrains cristallophylliens très variés (micaschistes, leptynites de couleur claire, amphibolites de couleur foncée), très régulièrement stratifiés. Au milieu d'eux, se sont injectés des filons de pegmatite qui étaient, à l'origine, presque exclusivement feldspathiques et dont la décomposition sur place a, par suite,
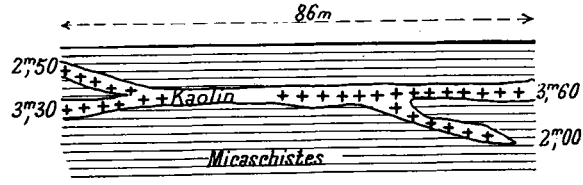


Fig. 62. — Coupe horizontale d'un filon de kaolin au milieu de micaschistes.

donné un kaolin très pur, sans quartz, ni mica. Les veines kaolineuses sont très irrégulières et présentent des formes variables (fig. 63) ; on les exploite en carrières, aux affleurements. En ce qui concerne la nature du kaolin, on distingue :

1° La granulite non décomposée (« caillou à émail ») ;

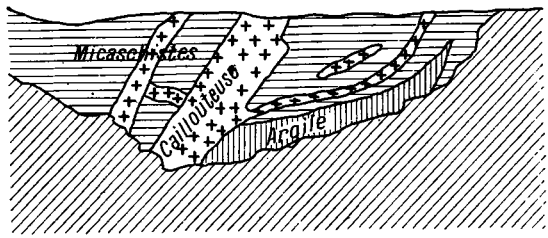


Fig. 63. — Coupe verticale d'une carrière de kaolin.

2° La granulite décomposée ayant conservé la structure originelle (« caillouteuse ») ;

3° La « sablonneuse », mélange de kaolin, de quartz et de mica blanc, avec des fragments de feldspath non décomposés ;

4° Le kaolin pur.

Gîtes sédimentaires. — Il existe des kaolins sédimentaires, en relation intime avec les roches provenant de la destruction du granite : arkoses, grès arkosiques, etc... Leur formation a nécessité l'existence d'une phase d'érosion mettant à nu des roches cristallines. En France, cette phase se rencontre dans le *Trias* et jusqu'au *Rhétien* ; on a alors des grès, des grès argileux, des arkoses et du kaolin. C'est le cas des gisements de la *Nièvre* situés sur l'emplacement d'une crête granitique dans le prolongement du grand sillon du Centre et exploités notamment à *Decize.*

En *Dordogne,* le groupe kaolinifère repose sur le Crétacé, mais à proximité du granite. On observe la présence de poches d'érosion avec forma-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

tions détritiques, sableuses, dans lesquelles s'isolent des paquets d'argile, avec de véritables kaolins. On avait admis, à une époque, leur origine geysérienne, en particulier pour le gîte des *Eyzies* ; il est beaucoup plus probable qu'il s'agit simplement de phénomènes de transport fluviatile ou lacustre. Du reste, sur le sable, est un banc de calcaire siliceux très dur, voisin de la meulière, où se manifeste la silicification ordinaire des plateaux de calcaire lacustre. Il y a fréquemment concentration de fer et de manganèse, au milieu des sables.

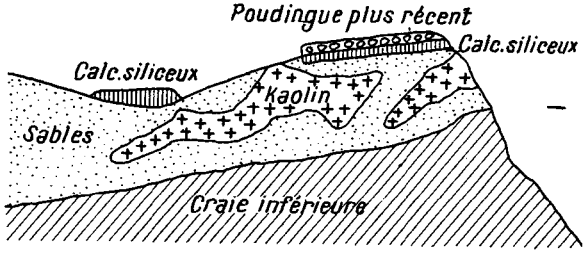


Fig. 64. — Coupe théorique du gisement de Queylan (Dordogne).

6. Gemmes. — Elles se sont produites à peu près toutes dans les mêmes conditions géologiques, par réactions de granulite et métamorphisme des calcaires. On les rencontre, soit dans les filons de granulite, soit dans les calcaires, exceptionnellement dans les schistes granulitisés.

Topaze. — C'est un silicate d'alumine fluoré ; on le trouve dans les granulites et les roches qui s'y rattachent, dans les filons d'étain (*Montebras*). Elle forme quelquefois de très grands cristaux.

La topaze se rencontre dans l'*Oural* et surtout au *Brésil* (*Ouro-Préto*), avec les phénacites et les euclases, au milieu de filons de pegmatite dans des schistes micacés.

Emeraude. — L'émeraude, ou béryl, est un silico-aluminate de glucine Elle se trouve dans les mêmes conditions que les topazes. A *Chanteloube*, près de Limoges, elle est associée avec les minéraux du groupe de l'étain, avec la montebrasite, etc... Les émeraudes industrielles viennent de l'*Oural*, où on les trouve dans les micaschistes avec phénacite, cymophane, etc... En *Egypte* (Mont-Sabara), les gisements d'émeraude se rencontrent dans les micaschistes. En *Nouvelle-Grenade* (*Muso*), les gisements sont encaissés dans des calcaires bitumineux néocomiens, métamorphisés. Actuellement, l'attention est très attirée sur les propriétés remarquables du glucinium ; mais la rareté de ce métal en rend l'application restreinte.

Grenats. — Les grenats sont des silicates doubles de bases sesquioxydes (Al, Fe, Cr) et de bases protoxydes (Ca, Mg, Fe, Mn, Cr). On les rencontre abondamment dans les granulites et les micaschistes grenatifères de *Bohême*, du *Plateau Central*, etc... Les calcaires métamorphisés par des

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

intrusions de roches éruptives contiennent du grenat, du pyroxène, de l'amphibole (Ex. : Banat). Les grenats industriels viennent surtout des alluvions de Bohême. On trouve parfois dans le Banat certains grenats, ayant plusieurs centimètres, que l'on a fait passer au haut fourneau comme minerai de fer.

Tourmaline. — La tourmaline (borosilicate fluorifère d'alumine) se rencontre dans les régions granulitisées et dans les gîtes stannifères ; elle vient des émanations fluorées. Les variétés roses, bleues, etc... ont une certaine valeur en bijouterie. Les gisements importants sont ceux de l'*Ile d'Elbe*, de *Ceylan*, de *Birmanie*.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XI

TITANE ET ZIRCONIUM

A. — TITANE

1. Usages. — Le titane n'a pas jusqu'ici d'emploi industriel important. On a songé un moment à l'utiliser pour fixer l'azote de l'air. On a commencé à en employer une certaine quantité dans la métallurgie du fer et, comme il existe dans le monde d'énormes gisements de titano-magnétite (10 à 15 % d'acide titanique), on peut s'attendre à une extension des applications, jusqu'ici restreintes, de 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 l'utilise aussi en électricité, dans les électrodes de lampes à arc, dans l'aviation de combat et, accessoirement, dans les manufactures de filaments pour lampes à incandescence et, depuis peu de temps, en peinture, dans la préparation d'un « blanc de titane » ayant un très grand pouvoir couvrant.

2. Minerais. — Le titane est beaucoup plus abondant qu'on ne le croit. Il existe à l'état de rutile et en association avec le fer et l'aluminium, dans les bauxites et la plupart des argiles.

Les minerais de titane se présentent surtout sous deux formes :

1° des oxydes (TiO^2) : anatase, brookite, *rutile* ;

2° le *fer titané* ou *ilménite* ($Ti\,Fe)^2O^3$.

3. Statistique. — Les pays producteurs de titane sont en 1929 :

L'*Inde* (8.000 tonnes environ de titane métallique).

Le *Sénégal* (2.000 tonnes environ).

La *Norvège* (2.000 tonnes environ).

Le *Brésil* (2.000 tonnes environ).

Les *Etats-Unis* (350 tonnes environ ; 1.400 tonnes en 1926).

Le *Canada* (550 tonnes).

Le *Portugal* (200 tonnes en 1927).

Au total la production du monde, en titane métallique, peut être estimée à 16.000 tonnes environ.

4. Gisements. — Le *rutile* ne se présente que très rarement avec de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

grandes dimensions. On le rencontre en milieu surtout acide (dans des pegmatites, granulites, granites).

Le *fer titané*, par contre, forme de très grandes masses, obtenues par ségrégation en milieu basique et constituant d'énormes réserves. Il n'est pas employé jusqu'à présent comme minerai de fer à cause de son infusibilité. Les principaux amas titanifères sont localisés dans la plate-forme scandinave et sont inclus dans des gabbros (hypérite à olivine) : *Taberg* et *Routivara* en *Suède*. Enfin le fer titané existe aussi en grandes quantités à l'état de sables à ilménite, d'origine détritique, sur certains plages littorales du *Golfe de Guinée* et du *Sénégal*. On entrevoit des possibilités d'exploitation de ces sables.

B. — ZIRCONIUM

1. Usages. — Le *zirconium* est très réfractaire. Chauffé, il émet une lumière extrêmement brillante. Aussi l'a-t-on utilisé comme produit incandescent dans certains manchons Auer, dans les lampes Nernst et dans les ampoules électriques à filaments de zircone.

Il donne, avec l'alizarine, des couleurs comparables aux jaunes de chrome.

2. Minerais et gisements. — Géologiquement, on trouve peu le zirconium à l'état d'oxyde (*zircone*) comparable au quartz, au rutile ou à la cassitérite, mais presque toujours à l'état de silicate simple ou complexe ou de titanate.

Le minerai ordinaire est le *zircon* (ZrO^2SiO^2). C'est un minéral très fréquent en inclusions microscopiques dans une foule de roches (granites, syénites, schistes cristallins) ; ses cristaux ne se sont développés avec d'assez grandes dimensions, qu'en des points plus rares, dans les mêmes roches. Ses gisements les plus riches sont dans les syénites néphéliniques, dites zirconiennes, de *Norvège*, de *Suède*, du *Groënland*, des *Monts-Ilmen*, du *Colorado*, de la *Caroline*. Pratiquement, on recueille beaucoup de zircon dans les alluvions (*Caroline, Ceylan, Brésil*).

Le zirconium est fréquemment associé avec le titane, le niobium, le tantale, le thorium et les métaux rares.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XII

ÉTAIN

1. Usages. — L'*étain* a été exploité depuis fort longtemps, malgré la difficulté que présente souvent la reconnaissance de la cassitérite. On a dû le tirer d'abord de sables à cassitérite ou de gisements qui montrent l'association du cuivre à l'étain. Il a donné naissance à un commerce très mportant dans l'antiquité qui l'employait sous forme de *bronze* et d'étain pur. Contrairement à une opinion que l'on a quelquefois émise, l'usage du bronze a suivi, et non précédé, l'emploi du cuivre pur. Puis le rôle du fer est devenu de plus en plus prépondérant. Au Moyen Age et à la Renaissance, l'étain fut très en faveur dans la fabrication des *ustensiles de ménage* : *vases*, *vaisselle*, etc... Cet emploi s'est encore conservé de nos jours, mais il est très réduit.

On l'utilise aujourd'hui sous forme de « *papier d'étain* » pour envelop per les produits alimentaires (mais ce débouché est concurrencé par l'aluminium) ; pour l'*étamage* des objets de cuisine (en grandes quantités) ; pour la fabrication du *fer blanc* (tôle recouverte d'une couche très mince d'alliage et d'étain pur) ; dans les *alliages* : bronze, laiton (cuivre et zinc avec un peu d'étain) ; pour la *soudure* par les plombiers, ferblantiers, etc. ; pour la fabrication des *caractères d'imprimerie* (20 d'antimoine pour 80 de plomb + 8 à 10 % d'étain qui donne un grain plus fin et une substance plus tenace) ; très accessoirement, pour l'*étamage des glaces* (en association avec Hg).

L'oxyde d'étain est employé dans la *poterie*, la *céramique*, dans la composition des couvertes et des émaux, pour donner de l'opalescence aux verres. La potée d'étain (alliage Sn + Pb calciné) sert dans le polissage des objets fabriqués.

L'étain est encore employé dans la fabrication de quelques *colorants* : or mussif, laques, pourpre de Cassius, etc...

2. Statistique. — *a*). *Les cours et la production.* — C'est un métal qui, en temps normal, tend à augmenter de valeur. Le prix était de 4.500 francs la tonne en 1800. Après s'être abaissé à 2.500 francs en 1890, il a suivi depuis une marche ascendante jusqu'à la guerre (3.400 francs en 1907 ; 4.500 francs en 1910 ; 5.300 francs en 1912). En 1932 (année de crise), l'étain vaut environ 13.000 à 14.000 francs réduits (2.600 à 2.800 francs-or).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

La production du monde en étain n'a pas cessé de s'accroître, sauf un moment après la guerre :

	Production mondiale en tonnes métriques	Cours moyen à Londres £ par tonne anglaise de 1016 kg.
1901	89.200	118
1905	96.600	143
1910	111.200	155
1914	125.836	156
1916	127.427	132
1920	124.051	296
1924	142.694	243
1926	145.157	291
1928	181.014	227
1929	193.663	200
1930	175.899	

Voici comment se répartit cette production totale entre les différents pays en 1929 :

Etats Malais (péninsule de Malacca)	70.500	tonnes	Au total : 106.000 t.
Indes Néerlandaises (Bangka, Billiton	35.500	»	
Bolivie	47.000	»	
Nigéria	10.600	»	
Siam	10.100	»	
Chine (Yunnan)	6.600	»	(Chiffre des exportations).
Angleterre (Cornwall).....	3.300	»	(5.000 t. en 1914).
Australie	2.500	»	
Inde anglaise (Birmanie).....	2.300	»	
Portugal et Espagne	1.500	»	
Union Sud-Africaine et Sud-Ouest Africain.....	1.400	»	
Congo belge	1.000	»	
Indo-Chine française	840	»	
Afrique Orientale	250	»	
Japon	170	»	

b) *Les centres de production.* — Les gisements d'étain sont localisés dans un très petit nombre de régions. Nous n'en trouvons pas en Amérique du Nord. Il y en a fort peu en Europe où l'exploitation, commencée dès l'antiquité, les a épuisés.

Les principaux centres de production sont de beaucoup les *Détroits Malais* et la *Bolivie.*

Les gisements des *Détroits* produisent actuellement plus de la moitié de la production mondiale. Dans les Indes néerlandaises, le centre le plus connu est *Bangka,* qui, exploité depuis 1718, a donné près de 1.000.000 tonnes d'étain pur et manifeste des signes d'épuisement ; *Billiton* est plus récent (exploité depuis 1852) ; *Singkep* n'a encore qu'une production

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

très faible. La production hollandaise, tombée à 18 ou 20.000 tonnes pendant la guerre, croît depuis 1920. Les Etats anglais de la presqu'île de *Malacca* représentent les 2/3 de la production des Détroits (régions de Pérak, Selangor, Negri Sembilan).

Les gisements de *Bolivie* sont très récemment exploités, mais leur production augmente tous les ans, ainsi qu'on peut en juger par le tableau suivant :

Années	Production d'étain
1900	7.000 tonnes
1906	16.700 »
1909	18.500 »
1914	22.700 »
1919	29.200 »
1925	32.600 »
1929	47.080 »
1930	37.600 »

Les mines sont situées en montagne à une altitude moyenne de 4.000 à 5.000 mètres et étaient difficilement accessibles autrefois. Les plus importantes sont celles de *Potosi*, *Chorolque*, *Tazna*, etc... actuellement en voie d'outillage perfectionné. Elles comportent, en même temps, des gisements de cuivre.

L'Australie a une production variable qui n'a jamais dépassé 6.000 tonnes et oscille depuis la guerre autour de 3.000 tonnes (5.800 en 1916 ; 2.600 en 1922 ; 3.000 en 1925 et en 1928) ; l'exploitation, très facile en surface, le devient beaucoup moins en profondeur. Les deux régions stannifères sont le *Queensland* (*Herberton*) et la *Tasmanie* (*Mount-Bischoff*).

Le *Yunnan chinois* a alimenté la consommation locale depuis très longtemps. Sa production était insignifiante il y a quelques années ; elle n'est redevenue importante que depuis la création du chemin de fer français du Yunnan. Les gisements, plus développés qu'on ne l'avait cru au début, ont produit : en 1914 : 1.800 tonnes ; en 1916 : 7.700 tonnes ; en 1920 : 10.700 tonnes ; en 1922 : 12.600 tonnes Depuis lors, la production s'est établie vers 7.000 tonnes. Les gisements chinois se prolongent vers le Siam et dans les territoires français (Laos et Tonkin), où ils s'appauvrissent.

L'Inde anglaise possède quelques gisements aux confins du Siam (1.000 à 2.500 tonnes).

L'Afrique présente 4 groupes :

1° Le *Swaziland*, à l'Est du Transvaal
2° Le *Transvaal*, district de Waterberg } 1.000 à 1.500 tonnes.

3° La *Nigeria*, le long de la Bénoué, dont les exploitations se sont développées grâce à la nouvelle voie de chemin de fer (4.600 tonnes en 1914 ; 7.150 tonnes en 1926 ; 10.600 tonnes en 1929).

4° Le *Katanga*, qui comporte des mines de cuivre et d'étain et a une production croissante depuis 1919 (45 tonnes en 1919 ; 500 tonnes en 1924 ; 1.200 tonnes en 1927).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Le *Cornwall* anglais a des exploitations très anciennes, connues depuis l'antiquité, dans les îles désignées par les Romains sous le nom de Cassitérides. Sa production s'est élevée à 5.000 et 6.000 tonnes (5.150 tonnes en 1914). Elle a fléchi fortement pendant et après la guerre (4.000 tonnes en 1918 ; 3.000 tonnes en 1920 ; 370 tonnes en 1922) et est remontée vers 3.000 tonnes.

Les autres gisements d'*Europe* se trouvent le long de la chaîne hercynienne : *Bohème*, *Saxe*, *France* (la Villeder, Montebras), Nord du *Portugal* (Ervedosa, environs de Bragance...). Peu riches, ils ont cependant joué autrefois un assez grand rôle.

3. Géologie des gisements. — Le mode de gisement de l'*étain*, les associations, la synthèse de la cassitérite, tout concourt à faire admettre, dans la majeure partie des cas, le départ de *fumerolles chaudes, chlorofluorées*, émanées de magmas granitiques et cristallisées dans ces roches ou à leur voisinage presque immédiat, dans les conditions demi-profondes où se sont formées les *granulites* et les *pegmatites* C'est dans ces roches *très acides* ou dans les *quartz de pegmatites* qui en dérivent que se trouve l'étain de préférence (gisements primaires).

A côté de ce type, on en connaît un autre plus rare, moins profond, dans les gisements tertiaires (Bolivie), se rattachant davantage au groupe des filons sulfurés concrétionnés, en relation avec des roches encore acides, mais presque superficielles (*liparites, dacites, rhyolites*).

Nous ferons donc deux grandes divisions d'inégale importance dans l'étude des gisements : gisements primaires et gisements tertiaires. Les premiers sont surtout dans les chaînes hercyniennes où les granulites apparaissent spécialement au jour : on n'en connaît pas dans les plates-formes primitives et peu dans les chaînes huroniennes et calédoniennes.

Revenons au type ordinaire, en relation avec des roches profondes. Selon que le départ filonien a été plus ou moins accentué, on a :

1. Des *inclusions* stannifères dans la roche granitique même, notamment à sa périphérie. L'étain à l'état microscopique se rencontre dans certains minéraux (micas lithinifères, blendes...) ; il existe aussi dans la granulite de Montebras (1/2 %).

2. Des réseaux plus ou moins irréguliers de *fissures en stockwerk* (*tinfloors*) dans la zone de contact du granite et des schistes encaissants. Dans ces veines de pegmatite, la cassitérite forme des paquets irrégulièrement disséminés, avec association du wolfram, du mispickel (parfois aurifère), du molybdène, de l'urane (rare), des minéraux fluorés (tourmaline, apatite, fluorine, topaze, phosphates divers, etc) ; sulfures rares.

3. Plus rarement, à quelque distance du granite, des *filons* proprement dits, plus continus, dans les cassures (*Tinlodes*). Ce sont les gîtes les plus réguliers, les plus riches. Il y a souvent association avec le cuivre. Le groupe du zinc et du plomb peut apparaître. Sulfures plus abondants (mispickel, chalcopyrite, bismuthine, molybdénite). En s'éloignant davantage de la roche mère, on passe à des filons de blende contenant des microlithes de cassitérite.

4. La destruction superficielle de tous ces gisements avec remaniement mécanique a donné lieu à des *éluvions* (altération sur place) et à de véri-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

tables *alluvions* (sables à cassitérite). Eluvions et alluvions ont constitué jusqu'ici la principale source d'étain, mais tendent à s'épuiser.

5. Dans certains cas, la cassitérite se trouve englobée, sous une forme difficile à discerner, *dans les chapeaux de fer* provenant de l'altération d'un filon en surface (Rammelsberg dans le Harz).

6. Enfin l'étain a pu être *remis en mouvement* et a pu recristalliser, nourrissant de petits cristaux ou donnant parfois de véritables chapeaux d'étain.

Minerais. — Le seul minerai exploitable est la *cassitérite* SnO^2, fréquemment cristallisée. Cette forme oxydée différencie l'étain de la plupart des métaux et le rapproche du silicium dont le minerai courant est également l'oxyde (silice = SiO^2).

La *stannine*, $Sn\,S^2$, est une curiosité minéralogique souvent associée à du cuivre et à des quantités très faibles de zinc.

La cassitérite a été obtenue *synthétiquement* de plusieurs manières, dont certaines semblent se rapprocher de son mode de formation dans les filons. Les principaux procédés sont : action d'un courant de $SnCl^4$ rencontrant de la vapeur d'eau ou de la chaux, au rouge ; ou décomposition du fluorure d'étain, $SnFl^4$, par l'eau ; ou action directe de l'acide chlorhydrique sur l'acide stannique en tubes scellés. La synthèse des minéraux associés à la cassitérite s'obtient par des procédés semblables.

On admet généralement que la cristallisation de la cassitérite a eu lieu dans des conditions analogues, sous l'action de chlorures et de fluorures. On a néanmoins objecté la présence de blende entourée de cassitérite (mais c'est assez rare) et la rareté de la fluorine, ce qui s'explique d'ailleurs par l'absence de chaux dans les roches associées.

Associations de l'étain. — L'étain s'associe très fréquemment avec le *cuivre*, l'or (que l'on rencontre d'autre part en pépites légèrement stannifères), le bismuth, le molybdène et surtout le *wolfram*, le *mispickel*, la pyrite ; une série de fluophosphates et de chlorophosphates de chaux, de soude, de lithine, comme l'apatite, la wawellite, la montebrasite, l'amblygonite, la cryolite et la fluorine ; les micas lithinifères ; la tourmaline, l'émeraude, la topaze, le grenat. L'antimoine, dont la zone de cristallisation est analogue et qui accompagne parfois l'or, est exceptionnel dans les filons d'étain.

On peut déceler la présence de l'étain par des indices tirés de la présence des minéraux associés. Il faut ajouter qu'à l'affleurement des filons d'étain, la kaolinisation est très fréquente et la décomposition des feldspaths donne des produits jaune verdâtre, caractère d'ailleurs commun aux filons d'étain et d'antimoine.

Roches transformées par la venue stannifère. — Les roches granitiques liées à l'étain ont souvent pris, au contact des veines stannifères, une structure très spéciale, le plus souvent due à une action des fumerolles acides qui ont apporté l'étain sur les éléments déjà cristallisés. Les feldspaths ont été attaqués par ces fumerolles ; ils ont presque disparu et on rencontre quelquefois des substitutions de la cassitérite aux feldspaths. Le long des veines stannifères, on observe souvent des roches constituées presque exclusivement par du quartz et du mica : *schorl, zwitter, greisen, hyalomicte*, où se sont développées de la tourmaline, de la topaze, de la fluorine, etc...

UNIVERSITÉ DE PARIS

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Il n'est pas impossible que cette pénétration de substances fluorées dans les granites qui encaissent les filons stannifères y ait facilité plus tard les progrès de la *kaolinisation* superficielle, phénomène très fréquent aux affleurements. Dans certaines formations éluviales, la cassitérite se trouve en liberté au milieu de produits kaolineux dont la séparation par lavage est facile (Mount-Bischoff).

Nature du terrain encaissant. — Le plus grand nombre des filons d'étain sont encaissés dans les roches cristallines dont ils dérivent (granites, granulites) ; on les rencontre aussi dans les schistes et quartzites voisins ; très rarement ils sont encaissés dans des calcaires où l'étain prend des formes curieuses (gisements dans les calcaires du Laos).

Variations des filons en profondeur. — Elles sont assez fréquentes, mais très irrégulières dans l'ensemble, quoiqu'on ait formulé des lois valables dans des districts particuliers. C'est ainsi que le gisement de Dolcoath présente du cuivre en surface et de l'étain en profondeur, avec passage continu de l'un à l'autre type (voir : Généralités).

On a constaté aussi des enrichissements superficiels, comme dans les mines du Rammelsberg, dans le Hartz où l'on a pu exploiter autrefois de l'étain dans le chapeau de fer du filon pyriteux, en Bolivie, etc... On a même annoncé la présence dans les eaux minérales d'un peu d'étain en solution.

I. — Étain primaire.

a) Gisements de Cornwall (Angleterre). — La Cornouailles ou Cornwall est constituée par une presqu'île où l'on observe un axe de plissements principal dirigé N. E — S. W.

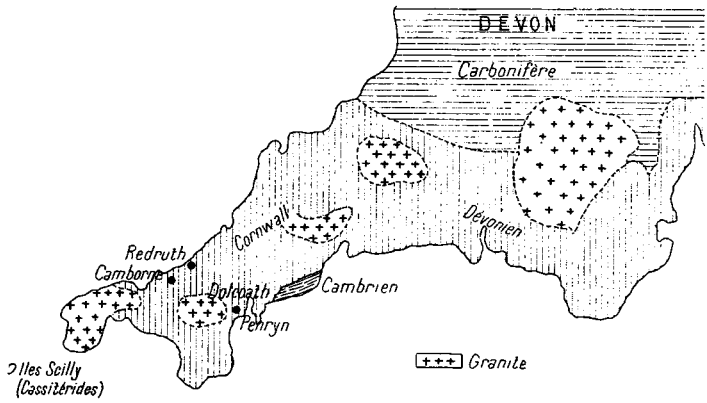


Fig. 65. — Carte schématique du Cornwall.

Il y a là une série de massifs granitiques (fig. 65), tous stannifères; mais, industriellement, le plus important est celui dans le voisinage duquel se trouvent les mines de Redruth, Camborne, Dolcoath, Penryn.

Ces massifs ont traversé du Dévonien métamorphique et du Carbonifère et sont recoupés par des pointements de granulite. Ils sont recouverts par des schistes micacés passant aux gneiss. L'ensemble est recoupé

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

par des filons d'*elvan* ou *aplite* présentant des directions de cassure très marquées et ayant jusqu'à 120 mètres de puissance. La même roche se rencontre aussi dans l'Oural, avec des filons aurifères.

Les gîtes sont toujours cantonnés sur la périphérie des massifs granitiques, en offrant, tantôt des mines d'étain, tantôt des mines de cuivre et étain.

En s'éloignant des massifs granitiques, on trouve successivement :

1° Des inclusions stannifères ;

2° Des stockwerks (réunions de veines très rapprochées arrivant à former une sorte d'amas) ;

3° Des stockwerks simplifiés ou tinfloors, soit dans la granulite, soit dans les schistes, où la chalcopyrite s'associe à l'étain ;

4° Des filons proprement dits, continus (tinlodes), où apparaît la blende avec l'étain et le cuivre.

L'ordre de succession des auréoles paraît dans l'ensemble assez net. Les gisements s'enrichissent en étain, quand on se rapproche du granite.

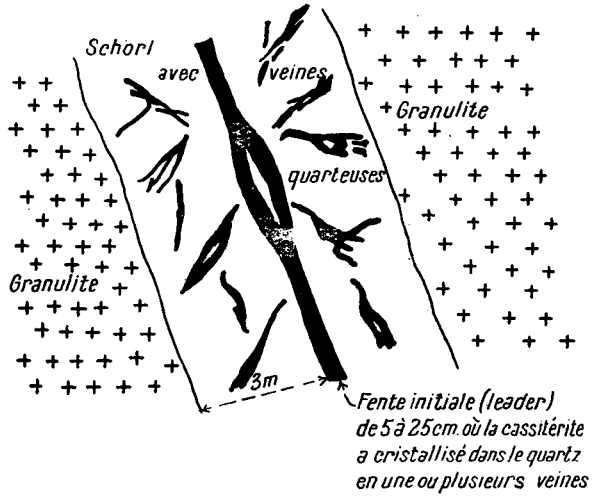


Fig. 66. — Coupe d'un filon d'étain en Cornwall.

Comme exemple caractéristique, le *great-flat-lode*, grand filon dont le type est si rare dans le cas de l'étain, montre un remplissage à peu près constant de quartz ferrugineux avec grands cristaux de cassitérite, au milieu d'un schorl stannifère avec tourmaline, tenant suivant les points de 1 à 3 % d'étain (fig. 66).

En général, les teneurs du tout-venant dans les mines varient de 1 à 1,5 % Sn. La profondeur maxima atteinte est de 920 mètres.

On a exploité aussi en Cornwall des alluvions stannifères, aujourd'hui épuisées. Presque tout l'étain y vient des *Tinlodes*.

Les minerais comprennent, outre la cassitérite et la chalcopyrite quelquefois transformée en érubescite, du wolfram, du mispickel, de la pyrite plus ou moins hématisée, de la bismuthine, des sels d'urane, de la blende, de la smaltine, de la galène.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

b) GISEMENTS DE BRETAGNE. — Ces gisements inexploités sont du même type qu'en Cornwall. On connaît, dans le *Morbihan* et la *Loire-Inférieure*, des quartz à cassitérite, avec sables stannifères sur certaines plages.

Dans l'intérieur du pays, le principal gisement est celui de *la Villeder* (*Morbihan*), dont l'exploitation remonte à la plus haute antiquité. Reprises en 1860, les mines furent assez prospères vers 1880, puis abandonnées en 1886 ; des essais de reprise ont eu lieu depuis. C'est un type de tinfloors présentant une grande irrégularité, au milieu d'une granulite et de schistes micacés rattachés au Cambrien. Ils ont été exploités un moment en tranchées. La cassitérite s'y trouve associée au *quartz*, à la *tourmaline*, à l'apatite, à la fluorine, à la molybdénite, au *mispickel* un peu aurifère, à la blende, à la pyrite, à la chalcopyrite et à la galène. Pas de wolfram.



Fig. 67. — Coupe des Carrières de la Villeder.

c) GISEMENTS DU PLATEAU CENTRAL. — Ces gisements sont connus depuis la plus haute antiquité, aussi bien au point de vue de l'étain qu'au point de vue de l'or (d'où les noms de localités comme Laurière). Aucun n'a donné des résultats bien fructueux et ils sont tous abandonnés. Certains filons de pegmatite contiennent du wolfram, du bismuth, de l'étain, du mispickel aurifère. Les fouilles étaient très faciles dans les parties kaolinisées ayant donné lieu à des éluvions, comme à Montebras.

Le gisement de *Montebras* (*Creuse*) est constitué par un massif de granulite, passant latéralement à une granulite porphyroïde, chargée de topaze avec veines de pegmatite et filons quartzeux. Les filons contiennent, tantôt de l'apatite, tantôt de l'amblygonite, tantôt de la cassitérite. La proportion de cassitérite est toujours faible. On a exploité aussi l'amblygonite, l'apatite et le kaolin. Pas de wolfram.

Les gisements de *Cieux* et *Vaulry* (*Haute-Vienne*) présentent de la cassitérite et du wolfram prédominant. On a exploité à Vaulry de la molybdénite (au début de la guerre) et du mispickel.

A *Chanteloube*, au *Nord de Limoges*, la pegmatite a donné naissance à des kaolins remarquables par la présence de beaux cristaux de cassitérite, d'émeraude (de grandes dimensions), de wolfram, de colombite (niobate de fer et de manganèse).

d) GISEMENTS DU PORTUGAL ET D'ESPAGNE. — Toute la partie nord-occidentale de la péninsule ibérique contient de l'étain et du wolfram qui sont exploités très sommairement en *Galice*, dans la région de *Coïmbre* (*Ervedosa*, *Penabiel*). Il s'agit de veines pegmatiteuses se détachant de massifs

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

granulitiques et plus ou moins interstratifiées dans les schistes voisins. L'étain est accompagné de quartz, de wolfram, de mispickel aurifère, de pyrite, de molybdénite, parfois d'uranite et de chalcopyrite. La cassitérite de Galice a souvent cristallisé au milieu de gros éléments de feldspath. A *Cacérès*, l'étain se trouve associé avec de l'apatite et voisin de filons de phosphorite avec lesquels on a cru qu'il pouvait être en relation.

e) GISEMENTS DE SAXE ET BOHÊME. — La chaîne de l'*Erzgebirge*, d'âge hercynien, offre des gisements de plomb et d'étain avec prédominance, tantôt de l'un, tantôt de l'autre. Les mines d'étain les plus connues

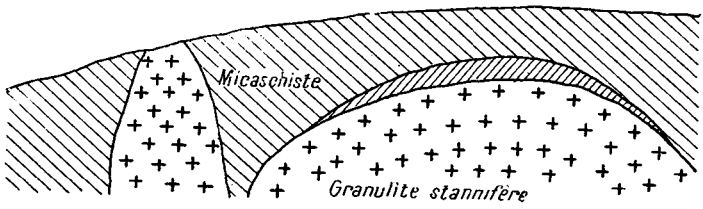


Fig. 68. — Coupe transversale du gîte de Weiss Andreas.

sont dans la région de *Freiberg*, à *Altenberg*, *Zinnwald*, *Graupen*, *Schlaggenwald*. C'est une région d'histoire compliquée qui, après les plissements primaires, a subi des mouvements secondaires et surtout des dislocations tertiaires qui ont fait rejouer les anciens filons et ont déterminé de nom-

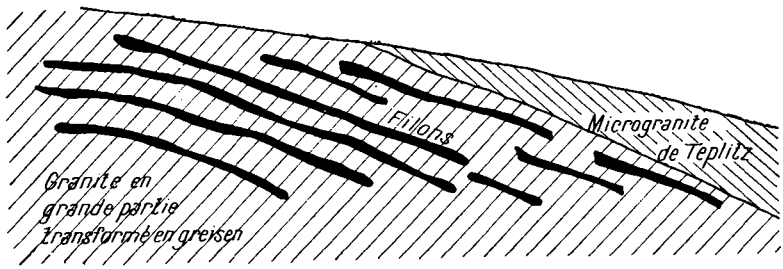


Fig. 69. — Coupe du Massif de Zinnwald (en partie).

breux épanchements volcaniques et de nombreuses sources thermales. Les gisements sont des types de stockwerks, de tinfloors, au contact des dômes de granulite (à grands cristaux) avec les schistes anciens. Les zones riches, appelées stockscheider, ont une puissance utile de 3 à 4 mètres. Il existe des filons en forme de coupoles et des veines pénétrant dans les schistes encaissants.

A *Weiss Andreas*, un massif de granulite stannifère est enveloppé d'un stockscheider : c'est une zone de cristallisation spéciale, pegmatoïde, à gros éléments, où s'est accumulée la cassitérite (4 mètres d'épaisseur).

A *Zinnwald*, le granite stannifère forme un dôme surbaissé, recouvert par du microgranite. Une série de filons, presque parallèles à la surface extérieure du dôme, le divisent en une succession d'assises emboitées. Ces filons couchés ressemblent un peu à des fentes de retrait, mais pourtant

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

se prolongent dans le porphyre encaissant où ils s'appauvrissent. Ils sont horizontaux à la partie supérieure du dôme granitique et plongent doucement ensuite dans tous les sens. Ils ont jusqu'à 0 m. 75 de puissance. Ils renferment une zone centrale quartzifère et stannifère avec développement maximum du wolfram et de la cassitérite sur le bord. On a, en outre, de la schéelite, de la galène, du cuivre gris, de la blende.

A *Schwarzenberg*, les gîtes stannifères sont dans des gneiss et micaschistes, mais ils suivent nettement des calcaires métamorphisés. Il s'est formé, comme toujours en milieu calcaire, des gangues silicatées (pyroxène, grenat) avec développement de fluorine, tourmaline, axinite, accusant l'action de fumerolles fluorées. Les minerais comprennent de la magnétite, de la cassitérite, du molybdène, du wolfram. En outre, le groupe sulfuré apparaît, soit à part, soit associé au groupe de l'étain ; il est constitué par la blende, la galène, la chalcopyrite, les pyrites, etc... Tous les minerais sont très irrégulièrement disséminés au milieu de la gangue de silicates.

f) GISEMENTS ASIATIQUES. — Une zone stannifère très remarquable commence dans l'Inde et au Yunnan et se poursuit, par le Laos, le Siam, la Birmanie, jusque dans la presqu'île de Malacca et jusqu'aux gisements des Indes hollandaises : Bangka, Billiton et Singkep. Elle se prolonge à Bornéo. Cette zone est en rapport avec des massifs granitiques recoupant les calcaires ouraliens et recouverts par les terrains plus récents, d'âge tertiaire.

Inde.— L'Inde est assez pauvre en étain qu'on rencontre toutefois dans le *Chota Nagpur*, dans la *présidence de Bombay* et à *Ceylan*, dans les mêmes conditions qu'en Bretagne.

Birmanie. — Les gisements de *Mergui* et de *Tenasserim*, au Sud de la Birmanie, sont exploités depuis longtemps. La cassitérite y est associée au wolfram dans des greisen.

Siam. — Les gisements siamois prolongent ceux de Malacca. Le principal centre d'extraction est *Yunk Seylon* où l'on exploite les alluvions par dragages.

Malacca. — A Malacca, on est en présence d'une succession de terrains allant jusqu'au Carbonifère inférieur et métamorphisés par le granite. Ce dernier passe à des granulites à mica blanc, puis aux pegmatites et au quartz. On y trouve toute une série de minéraux accessoires comme la topaze et la tourmaline.

Les exploitations ont surtout porté sur les alluvions, mais celles-ci s'épuisent et on commence à exploiter les *filons*. Ces derniers se trouvent, soit dans le calcaire ouralien, soit dans la granulite. Dans le calcaire, les filons sont irréguliers ; ils forment des poches ou remplissent des diaclases ; parfois très épais, ils disparaissent rapidement. Dans la granulite, au contraire, ils sont réguliers et renferment des sulfures métalliques, en particulier de la pyrite de cuivre et du mispickel. La cassitérite y est en grains fins, atteignant rarement le volume d'une fève, souvent associée à la pyrite cuivreuse. Il y a généralement 1 %, rarement 2 % et plus de Sn.

Les phénomènes d'érosion ont donné lieu à la formation d'*éluvions* sur les versants de la chaîne malaise. Ce sont des minerais irréguliers formés de sables riches en cassitérite qui passent à un conglomérat dur, ferrugi-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

neux, que l'on peut exploiter jusqu'à des teneurs très faibles. La proportion moyenne de cassitérite est de 1 %.

Les remaniements ultérieurs des éluvions ont donné naissance à des gisements d'*alluvions* qui ont leur plus grande richesse au débouché dans la plaine des ravins venant de la montagne, là où se produit une rupture de pente qui permet la précipitation des sables ; en général, ces points de concentration maxima ne sont pas distants de la montagne de plus d'un kilomètre. Les conditions d'exploitation des alluvions dépendent des terrains de recouvrement. On a été amené quelquefois à exploiter sous 24 mètres de stériles superficiels ; leur épaisseur est généralement de 7 à 8 mètres. Il faut préalablement débroussailler leur surface. Au-dessous des stériles, se trouvent, soit des blocs assez gros à teneurs variables, soit, quand on s'éloigne davantage du gisement originel, des sables plus fins. La couche stannifère a quelquefois 2 à 3 mètres ; une bonne moyenne est 1 m. 50 ; mais, au-dessous de ce chiffre, le travail n'est plus guère fructueux. La teneur a atteint exceptionnellement 5 % ; en moyenne elle est de 1 %. On a exploité jusqu'à 0,9 %.

Indes hollandaises (*Bangka*, *Billiton*, etc.). — Les conditions tectoniques sont les mêmes que dans les gisements précédents ; on a affaire à des schistes anciens recoupés par des filons, avec phénomènes de métamorphisme ayant donné des greisens. Dans les filons, la cassitérite est associée à du sulfure de fer, transformé superficiellement en hématite ou en sidérose et même quelquefois en magnétite. Les gisements en place ont donné naissance à des gisements d'*éluvions* et d'*alluvions*. Les premiers sont peu développés ; les seconds forment, par endroits, deux couches tenant en moyenne 0,8 à 1 % de cassitérite avec des parties riches pouvant atteindre 4 %. On a trouvé, aux affleurements des filons, de très gros blocs de cassitérite compacte, pesant jusqu'à 1.000 kilogs et paraissant provenir d'un enrichissement dont le processus reste obscur.

Laos. — Les gisements du *Laos* n'ont pas une grosse importance industrielle quoiqu'ils se soient développés récemment au N.W. de *Thakhek* à Hin Boun. On n'y trouve pas de wolfram. La cassitérite se présente dans une formation ferrugineuse latéritique où elle est invisible à l'œil nu. Les filons en place (cassitérite, pyrite, mispickel) sont connus à Boneng.

Depuis longtemps, les indigènes extrayaient le minerai par petits puits de 10 mètres de profondeur et procédaient à une préparation mécanique sommaire donnant un mélange de cassitérite et de limonite avec une assez forte proportion de bismuth, molybdène et cuivre. Le minerai pratique est un mélange d'oxyde de fer et de cassitérite, difficilement purifiable.

Tonkin. — Quelques gisements peu importants, dont le développement est stationnaire, y prolongent ceux du Yunnan (Pia Ouac et Beausite dans le Haut Tonkin). Contrairement à ce qui se passe dans le Laos, on y trouve du wolfram et du fer titané, notamment dans les alluvions de Tinh-Tuc.

Yunnan. — La zone stannifère du Yunnan a eu un grand développement autrefois. Elle se trouve non loin de la zone mercurielle tertiaire.

Les filons du Yunnan paraissent un peu plus récents que ceux de Malacca. Ils sont encaissés dans des calcaires permo-triasiques. Leur allure est irrégulière ; ils sont formés de veines avec cassitérite et un peu de cuivre dont la proportion semble augmenter à mesure qu'on s'enfonce (pyrite,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

mispickel, chalcopyrite). Ces filons peu étudiés sont peut-être en relation avec des roches microgrenues et microlithiques.

Ces gisements se rattachent d'ailleurs à un groupe important de mines cuprifères renfermant un peu d'étain.

g) GISEMENTS AUSTRALIENS.— Les gisements les plus importants sont ceux du *Mount-Bischoff* en *Tasmanie*. Ils comprennent des schistes et quartzites paléozoïques, avec des filons de porphyre ou de granulite porphyroïde. Il y a eu production de phénomènes métamorphiques. Porphyres et schistes sont recoupés par des venues stannifères, contenant de la topaze, de la tourmaline, du wolfram, du mispickel, du cuivre, etc...

On a surtout exploité des gisements d'éluvions formés d'empilements de blocs, pouvant atteindre une épaisseur de 20 mètres sur des pentes de 45°. Les exploitations ont aussi porté sur des alluvions.

Dans le *Queensland*, les conditions sont sensiblement les mêmes.

h) GISEMENTS AFRICAINS. — Les conditions sont encore les mêmes. Les exploitations ont commencé depuis peu ; elles se développent et ont un avenir sérieux.

Les régions stannifères sont celles du *Swaziland* à l'Est du Transvaal, du *Waterberg* (*Transvaal* au NW de Pretoria), de la *Nigeria* et du *Katanga*. Les premières exploitations industrielles ont porté surtout sur le Swaziland et le Waterberg. On a là des pegmatites stannifères passant au quartz et recouvertes par les formations horizontales du Karoo (Carbonifère). Dans le Katanga, le groupe présente un développement stannifère très remarquable.

II. — ETAIN TERTIAIRE.

Ces gisements, rares et variés, ont surtout de l'importance en Bolivie.

a) BOLIVIE. — La région cupro-stannifère se trouve à l'Est de la Bolivie, sur le flanc Est du plateau des Andes. Elle occupe une superficie de 1.500 × 300 km. L'altitude est considérable. Certains sommets atteignent 6.000 et 6.600 mètres. Les gisements se trouvent dans la zone jalonnée par les villes de *La Paz*, *Chorolque*, *Oruro* et *Potosi*.

L'étain y est associé à un groupe de roches tertiaires recoupant des terrains divers (Primaire, Crétacé). Ce groupe comprend des microgranulites passant progressivement à des types pétrosiliceux (*rhyolithes*). On trouve des filons bien définis en relation avec des dacites, des rhyolithes, c'est-à-dire des roches voisines de l'état où elles peuvent s'épancher. La cassitérite est associée à de la pyrite, du bismuth (très abondant), du cuivre (cuivre gris en surface, chalcopyrite en profondeur) et même de l'argent et de l'or dont les gisements superficiels avaient été exploités autrefois.

A Oruro, le gisement est dans la rhyolithe ; cette dernière a subi une transformation, par suite de laquelle le feldspath a été remplacé par de la cassitérite et de la tourmaline. Des phénomènes d'enrichissement superficiel, de nourrissage de cristaux se sont produits fréquemment ; l'étain a pris parfois la forme dite étain de bois. Dans un autre gisement, on a observé un curieux phénomène de remise en mouvement qui a laissé, dans

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

les parties hautes du filon, des cavités tubulaires à stalactites d'oxyde de fer, au-dessous desquelles, 20 à 50 mètres plus bas, s'est produit un enrichissement mécanique en étain pouvant donner 60 % de $Sn\,O^2$ réparti dans une matière argileuse.

b) Arménie. — On y connaît un certain nombre de petits gisements tertiaires avec cuivre et molybdène, dont l'intérêt est surtout historique.

c) Toscane (Campiglia Marittima). — Les exploitations sont abandonnées depuis longtemps ; mais elles ont été actives à la période étrusque. L'étain se rencontre dans des conditions analogues à celles que nous avons signalées au Laos : filons remplis d'oxyde de fer et de cassitérite extrêmement fine. Les gîtes sont encaissés dans des calcaires ; la limonite provient de l'altération de la pyrite ou du mispickel ; la formation semble en rapport avec les venues granulitiques d'âge tertiaire de l'île d'Elbe.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XIII

URANIUM ET RADIUM

1. Usages. — L'uranium a un certain nombre d'applications, surtout pour la fabrication des *matières colorantes* (vert, jaune, noir). Les oxydes d'urane servent à la coloration des verres et porcelaines. Il a également des applications basées sur sa *grande résistance électrique* et il est employé dans certains *alliages métalliques* avec le platine et le cuivre. Mais il est surtout recherché pour son association avec le radium.

2. Statistique. — L'uranium a une valeur élevée et un emploi restreint; cependant, depuis quelques années, l'exploitation s'en est développée. La production mondiale s'est élevée de 5 tonnes à 12 ou 15 tonnes.

Quant à la production du monde en radium, on l'a estimée, jusqu'en 1926, au total à 507 grammes, répartis comme suit :

Etats-Unis	250	grammes	
Congo Belge.....	180	»	(270 grammes jusqu'en 1930)
Tchécoslovaquie	42	»	
Portugal	15	»	
Madagascar	8	»	
Russie (Ferghana)	6	»	
Cornwall anglais	5	»	
Australie méridionale.....	1	»	

En 1930, les seules productions de radium ont été celles du Congo Belge et de la Tchéco-Slovaquie. A lui seul, le *Congo belge* (Union minière du Haut Katanga) a produit 42 grammes de radium en 1928, 60 grammes en 1929 et en 1930, vendus environ un million de francs réduits le gramme. Quant à la *Tchéco-Slovaquie*, sa production est estimée à 3 gr. 5 en 1929 et 1930.

3. Minerais. — Ce sont la *pechblende* ou *pechurane* (U^3O^8), substance très complexe mélangée à d'autres corps (molybdène, tungstène, fer, manganèse, etc...), les phosphates d'urane, la *chalcolite* (urano-phosphate de cuivre), l'*autunite* ou *uranite* (urano-phosphate de chaux) ; la *curite* (urano-phosphate de plomb) ; les vanadates, la *carnotite* (vanadate d'uranium et de potassium), etc...

4. Géologie. — Ces minerais sont en relation fréquente avec les gîtes

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

de l'étain ou du bismuth. Il y a eu superficiellement des remises en mouvement concentrant les sels d'urane dans des fissures à l'état de pellicules et d'enduits ; ces remises en mouvement peuvent être très récentes. A Madagascar, on trouve ainsi de l'autunite dans des tourbières presque contemporaines. Cependant, à Joachimsthal (Bohême), l'uranium persiste en profondeur et y est associé à des minerais oxydés.

De même ,le radium est toujours en relation avec des phénomènes d'altération ; on rencontre en particulier ses émanations dans les eaux et il semble avoir partout une tendance à s'élever de la profondeur vers la surface.

Tout cela est encore très obscur, à cause des phénomènes de transmutation.

5. Gisements. — *a*) Celui de *Joachimsthal*, dans l'Erzgebirge (*Bohême*), appartient à une chaîne métallifère qui commence à Freiberg et qui est jalonnée par des cassures et des sources thermales.

Les filons s'y rencontrent dans des calcschistes, des schistes micacés et des schistes amphiboliques. Ils appartiennent à un système de filons formant quadrillage et se coupant à angle droit. Les uns, Est-Ouest, sont à peu près sans valeur aujourd'hui ; les autres, Nord-Sud, sont exploités pour l'uranium, le radium, l'argent et le bismuth.

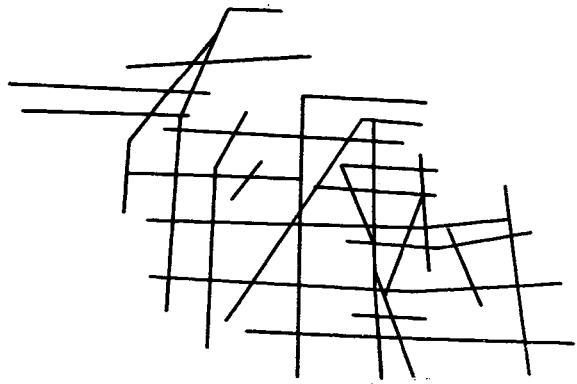


Fig. 70. — Plan schématique du champ de filons de Joachimsthal.

L'uranium y est d'ordinaire à l'état de pechblende, exceptionnellement en enduits d'autunite. La pechblende forme des veinules très étroites, dépassant rarement 3 ou 4 cm. Elle est souvent associée avec des débris provenant du broyage des terrains encaissants, avec de l'argile, de la dolomie et de la calcite (pas de quartz). Elle est accompagnée de pyrite que l'on voit se transformer en hématite, de chalcopyrite, souvent d'argent rouge et noir et d'argent natif, ailleurs d'arsenic natif, ou bien de minerais complexes de nickel, cobalt, bismuth et de galène.

Il faut mentionner le développement simultané de la *wernérite* et de la pechblende dans certains schistes. La production de la wernérite aux dépens des feldspaths accuse, comme dans les gisements phosphatés de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Norvège, l'action des fumerolles fluorées. Les altérations jouent un très grand rôle dans tout le gisement (argent noir et rouge, argent natif). Les gîtes se poursuivent à une grande profondeur. Le niveau hydrostatique est à 300 mètres de profondeur, ce qui est une gêne pour les travaux ; cependant on est descendu au-dessous et on a continué à y trouver des minerais d'uranium, mais ils sont encore liés à des phénomènes d'altérations.

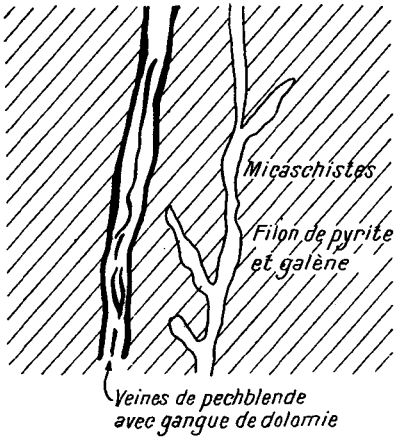


Fig. 71. — Coupe verticale d'un filon à Joachimsthal.

b) Le *Nord du Portugal* contient des gîtes d'autunite, associés à des granulites, dans des conditions analogues à celles où se trouvent, dans la même région, les gîtes d'étain et de tungstène.

c) En *Cornwall* anglais, il en est de même.

d) En *Saône-et-Loire*, on trouve de l'autunite et des minerais radio-actifs dans des pyromorphites sur l'affleurement de filons de plomb.

e) A *Madagascar*, les veines d'autunite se trouvent dans les tourbières.

f) En *Afrique Centrale*, dans le Congo Belge près de la Rhodésia, à Chinkolobwe, on exploite également des sels d'urane d'où on tire du radium. Le minerai, disposé par poches irrégulières, est formé de composés divers contenant, avec l'urane, du phosphore, du cuivre, du plomb, etc.

g) On a découvert récemment au *Canada* un gîte de radium qui paraît très riche. Ce gisement, composé de pechblende et argent natif, se trouve à Echo-Bay, lac de l'Ours.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XIV

TUNGSTÈNE

---

1. Usages. — Ce métal a été longtemps considéré comme une gêne dans les exploitations d'étain ; il avait peu d'emplois. Aujourd'hui on l'associe au fer pour la fabrication d'*aciers très durs* servant pour le travail des métaux, la fabrication de ressorts, etc... Le tungstène durcit les aciers, leur donne une texture plus serrée qui devient soyeuse par la trempe, en abaisse le point de fusion. Ces aciers deviennent fragiles quand ils contiennent trop de carbone. La teneur des aciers en tungstène est variable :

pour les ressorts 0,6 % ;
pour les aimants permanents 6 % ;
pour les outils 2,5 % (+ 1 % de carbone, avec une petite quantité de chrome et de molybdène).

Le tunsgtène est vendu sous la forme de tungstène métallique à 96 ou 98 % et sous celle de ferro-tungstène à 70 %. La fabrication est surtout concentrée dans le Hanovre et en Angleterre.

On utilise aussi, pour la fabrication des *lampes électriques*, du tungstène en poudre, formant pâte avec de la gomme ; mais cette industrie consomme peu de tungstène, car une tonne de wolfram suffit à fabriquer 18 millions de lampes.

Le développement du tungstène est donc lié à l'essor de ses applications métallurgiques.

2. Statistique. — La production du tungstène, estimée en concentrés à 60 % d'acide tungstique, n'était encore que de 150 à 200 tonnes vers 1900 ; elle a atteint 5.250 tonnes en 1909, 8.000 tonnes en 1913, 26.000 tonnes pendant la guerre (1917) ; elle est tombée à 5.600 tonnes en 1921, puis est remontée progressivement : 10.000 tonnes en 1925, 18.000 tonnes en 1928, 16.000 tonnes en 1929, 15.000 tonnes en 1930.

Le principal pays producteur est la *Chine* qui fournit au moins la moitié de la production mondiale : 10.000 tonnes en 1929, 7.700 tonnes en 1930 (3.000 tonnes en 1924).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Puis viennent des productions moins importantes :

	1929	1930	Divers
	tonnes	tonnes	
Birmanie	1.450	2.800	(4.200 en 1917 ; 950 en 1923 ; 1.900 en 1926).
Etats-Unis	750	650	(5.600 en 1917 ; 200 en 1923 ; 1.250 en 1926).
Bolivie	1.600	900	(4.200 en 1917 ; 20 en 1924 ; 100 en 1926).
Portugal	700	350	(1.600 en 1917 ; 300 en 1923 ; 350 en 1926).
Argentine	60	100	(1.100 en 1917 ; 4 en 1925).
Australasie	300	200	(1.500 en 1917 ; 70 en 1921).
Espagne	200	250	(30 en 1921 ; 160 en 1928).
Pérou	100	240	(250 en 1918 ; rien en 1924).
Indo-Chine française	200		(430 en 1917 ; 150 en 1924).
Japon	300	190	(1.700 en 1917 ; 15 en 1925 ; 350 en 1927).
Etats-Malais	500	1.100	(1.200 en 1917 ; 400 en 1926).
Angleterre	27	150	(400 en 1909 ; 2 en 1924).
Saxe et Bohême	120	100	(300 en 1917).
France	15	20	(260 en 1917 ; 150 en 1925).

3. Minerais. — Le *wolfram* (Mn, Fe) WO^4 est le minerai le plus recherché. Aujourd'hui, avec le traitement électrique, on peut utiliser aussi la *schéelite* Ca WO^4 (minerai de surface).

Ces minerais se vendent généralement à la teneur de 60 % d'acide tungstique en spécifiant un maximum pour le phosphore, le soufre, l'étain. Les prix en sont variables et se cotent à l'unité d'acide tungstique : pour minerais à plus de 65 % d'acide tungstique 13 francs en 1897, 63 francs en 1907 à cause de la crise américaine, 38 francs en 1910, 19 francs-or en 1932. La tonne de wolfram ressortait à 1.800 francs et la tonne de tungstène à 4.000 francs avant la guerre.

4. Gisements. — Les gisements de tungstène sont presque tous des gisements d'étain ou des gisements analogues ; leur description est par suite inutile.

En beaucoup de points, l'exploitation consiste surtout à reprendre les haldes d'étain et à faire un triage.

En *Australie* (*Queensland*), le wolfram existe dans les filons d'étain ; on trouve aussi de la schéelite associée à des filons de quartz aurifère.

A *Meymac* (*Corrèze*), la schéelite a été rencontrée dans des gîtes de bismuth.

A *Puy-les-Vignes* (*Haute-Vienne*), les filons contiennent un peu de wolfram et d'étain ; ils sont encaissés dans les micaschistes.

En *République Argentine*, on a trouvé des filons intéressants par leur extension et leur continuité. Leur accès est difficile ; cependant on les exploite activement (*Los Condores*). Du granite traverse des schistes

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

métamorphisés ; au contact se trouvent des pegmatites avec tourmaline, apatite, fluorine, grenat et des métaux du groupe du tungstène, un peu de chalcopyrite, mais pas d'étain. Malgré des frais de transport énormes, on a pu organiser une certaine production.

Au *Pérou* (*Angaraes*), des gisements analogues contiennent une association de wolfram et d'or (sur des échantillons triés, il y aurait 400 grammes d'or par tonne de wolfram).

Il est intéressant d'y noter l'association de l'or avec les minerais du groupe stannifère. Cette association de l'or et du tungstène existe également au *Brésil*, à *Cavallo Branco*, où les hématites aurifères s'accompagnent de stolzite (tungstate de plomb) et de schéelite.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XV

POTASSIUM ET SODIUM

A. — POTASSIUM

Le potassium a des usages très développés ; ses sels sont des substances rares et recherchées. On les exploite presque exclusivement en Allemagne, qui en a eu longtemps le monopole, et en Alsace ; très accessoirement aux Etat-Unis, en Russie, en Pologne et en Espagne.

1. Usages. — Le *potassium métallique* peut servir à la réduction des oxydes et des sulfures ; mais, très coûteux, il est remplacé par le sodium. On utilise plusieurs de ses composés qui donnent lieu à une industrie importante :

Potasse caustique : réactif chimique, pierre à cautères, savons.

Chlorure de potassium : matière première de l'industrie des sels de potasse, médicament, engrais.

Bromure et iodure de potassium : médecine et photographie.

Cyanure de potassium : traitement des minerais d'or ; galvanoplastie ; photographie. Industrie des prussiates qui donnent le bleu de Prusse.

Foie de soufre (mélange de sulfate et de polysulfure) : bains sulfureux.

Carbonate de potassium : verrerie, savons mous.

Hypochlorite de potassium (Eau de Javel) : décolorant.

Chlorate de potassium : poudres brisantes, capsules fulminantes, allumettes, poudres-éclair au magnésium ; avivage des couleurs d'impressions, thérapeutique.

Azotate de potassium (salpêtre) : fabrication des poudres de chasse et de mines ; engrais azoté et potassique ; thérapeutique ; oxydant en métallurgie ; conservation des viandes salées.

Chromate de potassium : matières colorantes.

Silicate de potassium : donne des verres solubles ; rend incombustibles diverses matières ; permet de durcir le calcaire tendre ; fixatif pour les peintures murales.

Sulfate de potassium : fabrication de l'alun de potasse ; médecine ; engrais.

Le principal usage du potassium est son emploi en agriculture comme engrais.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

En mars 1932, la sylvinite à 12 % vaut en Alsace 10 francs 60 les 100 kg. (francs réduits) ; le chlorure de potassium à 49 % 68,70 contre 21 francs-or avant guerre ; le sulfate de potassium à 46 %, 94 francs.

2. Statistique et Centres de production. — Le potassium a été longtemps tiré presque exclusivement de sources organiques. Il vient maintenant à peu près entièrement de *Stassfurt* et d'*Alsace*. On peut citer aussi le gîte de *Solikansk* dans le permien de l'oural, celui de *Carlsbad* au Texas, celui de *Kalusz* en Galicie polonaise et celui de *Suria* en Catalogne.

L'*Allemagne* produisait avant 1919, y compris l'Alsace :

1910	730.000	tonnes (1)
1913	1.220.000	»
1915	745.000	»
1918	1.100.000	»

Depuis 1919, le gîte de Stassfurt a une production qui varie entre 900.000 tonnes et 1.700.000 tonnes :

1919	900.000	tonnes
1922	1.500.000	»
1924	1.000.000	»
1925	1.575.000	»
1929	1.790.000	tonnes (7/10 de la production mondiale).

L'*Alsace* a une production qui croît dans l'ensemble :

1919	150.000	tonnes	(590.000 tonnes sels bruts).
1920	260.000	»	(1.220.000 » »).
1922	210.000	»	(1.325.000 » »).
1924	270.000	»	(1.230.000 » »).
1926	350.000	»	(2.317.000 » »).
1929	500.000	»	(3.125.000 tonnes sels bruts)
1930	500.000	»	(1/5 de la production mondiale).

En outre les *Etats-Unis* ont donné 56.000 tonnes en 1929, la *Pologne* 55.000 tonnes ; l'*Espagne* 25.000 tonnes.

Au total, la production mondiale, en quantité de potasse pure, est estimée à environ 2.360.000 tonnes (1929).

3. Gisements. — Géologiquement, le potassium se trouve dans toutes les roches. Leur teneur, toujours assez forte (en moyenne 2,80 % de potasse), est inférieure à la teneur en soude (en moyenne 3,60 %). Cette teneur est souvent dépassée (orthose, 17 % ; leucite, 22 % ; biotite, 9 %). Il y a de ce fait une certaine influence de la roche altérée sur la végétation ; certaines roches décomposées donnent de véritables engrais. Dans quelques cas, on a essayé de traiter directement les minéraux potassiques, par exemple, la leucite d'Italie, facile à trier par des procédés magnétiques, de façon à obtenir un minerai à 18 % de potassium.

La teneur en potasse des roches est d'ailleurs modifiée par la dissolution : la potasse est soluble dans les eaux chargées de sels et d'acides et se concentre dans des bassins d'évaporation.

Enfin, comme les autres alcalis, elle a dû jouer un rôle dans l'incrusta-

(1) Tous ces chiffres sont ramenés aux quantités de potasse pure (K^2O).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

tion de certains filons hydrothermaux, mais ces alcalis solubles ne sont pas restés dans les filons.

a) GISEMENT DE STASSFURT. — D'âge permien, il est, comme le gîte tertiaire d'Alsace, dû à des concentrations dans des lagunes et à une évaporation poussée assez loin pour aller jusqu'aux sels déliquescents.

Le gîte de Stassfurt se trouve aux environs de Magdebourg dans la partie supérieure du *Zechstein*. Les formations salines sont très puissantes dans toute l'Allemagne du Nord ; le sondage de Sperenberg les a traversées sur 1.270 mètres ; mais il n'y a qu'un point où l'on ait trouvé des sels de potassium. Ceux-ci reposent sur une puissante assise de sel gemme.

Sous le Pléistocène de la région, affleurent des terrains plissés, suivant une direction N.-W. /S.-E. ; un des anticlinaux fait apparaître du Permien, recouvert sur ses deux flancs par des grès bigarrés, du Muschelkak, des marnes irisées.

La coupe du gisement est la suivante, de haut en bas :

7. Schistes bitumineux et calcaire grenu (Rogenstein).
6. Jüngeres Steinsalz (sel récent).
5. Zone du gypse (SO^4Ca, $2H^2O$) et de l'anhydrite SO^4Ca).
4. Zone de la carnallite (KCl, $MgCl^2$, $6H^2O$) associée à la Kaïnite et à la sylvine (KCl) [40 mètres].

Zone salifère

3. Zone de la kiesérite (SO^4Mg, H^2O) [60 mètres].
2. Zone de la polyhalite ($2SO^4Ca$, SO^4K^2, SO^4Mg, $2H^2O$) accompagnée de sel impur [60 mètres].
1. Zone du sel pur ancien, avec bancs d'anhydrite [plus de 330 mètres].

Une coupe transversale donne une succession très régulière ; une coupe longitudinale montre une irrégularité beaucoup plus grande ; il y a donc

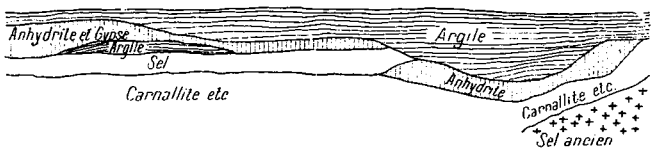


Fig. 72. — Coupe transversale du gisement de Stassfurt.

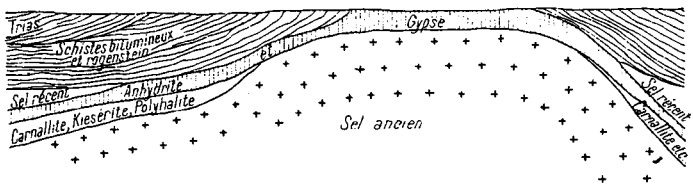


Fig. 73. — Coupe longitudinale du gisement de Stassfurt.

eu des phénomènes complexes, contemporains du dépôt. On en retrouve, d'ailleurs, des traces dans le détail.

Le *sel gemme ancien* de la zone 1 présente des structures très diverses ; il est tantôt compact sans stratification, tantôt fibreux et laminé par des

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

actions mécaniques. Il est tantôt pur, tantôt mélangé de cristaux microscopiques d'anhydrite. Comme les sels potassiques des zones superposées, il contient des gaz grisouteux, des carbures d'hydrogène gazeux, qui produisent la « pousse » à l'abatage et la décrépitation par chauffage du sel. Il renferme aussi un peu d'hélium et d'hydrogène. L'anhydrite existe, soit en petits cristaux disséminés, soit en petites couches régulières de 6 millimètres, épaisseur moyenne, alternant régulièrement avec le sel et dans la formation desquelles on a pu voir un phénomène périodique (de là leur nom de Jahrringe = anneaux d'un an). La présence du sulfate de calcium rend ce sel impropre à la consommation ; il doit subir une préparation préalable. Dans l'ensemble, l'anhydrite représente 5 % du total.

La *polyhalite* de la zone 2 (mélange de trois sulfates dont il est pratiquement difficile d'extraire le sulfate de potassium) se présente, comme l'anhydrite de la zone 1, en petites couches de 2 à 3 centimètres d'épaisseur, alternant régulièrement avec le sel. Ces couches, comme celles d'anhydrite, sont très lisses à la partie supérieure et rugueuses à la partie inférieure : ce dernier caractère semble indiquer des phénomènes de ravinement à la surface du sel avant le dépôt de chacun des bancs d'anhydrite ou de polyhalite. Le sel de cette 2e zone est chargé de sels magnésiens (0,50 %) qui le rendent déliquescent et amer.

La *kiesérite* de la zone 3 forme des couches moins régulières que la polyhalite, de 3 à 30 centimètres d'épaisseur alternant avec le sel. A l'air, elle se transforme en epsomite ; avec l'eau, elle forme d'abord une masse solide, un ciment, en augmentant de volume, puis elle se dissout lentement ; cette propriété est à retenir comme pouvant amener des difficultés dans les sondages. Elle se mélange, dans la partie supérieure de la zone 3, avec un peu de carnallite.

C'est sur la zone 4 que porte surtout l'exploitation. La *carnallite* y est, tantôt blanche (pure), tantôt rouge (sels de fer), tantôt noir bleuté (matières bitumineuses). En présence d'une quantité insuffisante d'eau, elle se dissocie et seul le chlorure de potassium reste solide ; avec un excès d'eau, elle se dissout complètement et il reste un petit résidu terrigène de quartz, d'argile, d'oxyde de fer et de rutile. Elle forme des bancs stratifiés atteignant 2 mètres d'épaisseur et alternant avec du sel gemme et de petites couches de kiesérite de quelques centimètres. Cette dernière disparaît progressivement vers le haut. La carnallite est accompagnée d'un peu de *sylvine* (qu'on trouve aussi en Alsace), de *kaïnite* provenant d'une altération superficielle (chlorure de magnésium + sulfate de magnésium) et de *stassfurtite* (borate de magnésium + chlorure de magnésium). Ce dernier sel, qui s'est concentré dans les parties hautes, se trouve, ou en petits cristaux épars, ou en boules concrétionnées qui pèsent jusqu'à 10 kilos et qu'on recueille soigneusement.

Quant au gypse de la zone 5 et au *sel récent* de la zone 6, ils marquent le début d'une 2e phase d'évaporation, consécutive à une irruption marine après le dépôt des derniers sels potassiques. Toute communication avec la mer avait dû être rompue à partir du dépôt de la polyhalite. La forme anticlinale actuelle du gisement serait due à un plissement ultérieur.

L'exploitation des sels de Stassfurt, commencée vers 1840 et développée surtout en 1861, merveilleusement conduite, donne naissance à une indus-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

trie et à un commerce bien organisés. Il en sort toute une gamme d'engrais bien définis, toujours mêlés à un peu de sel gemme qui ne peut présenter que des avantages au point de vue agricole. Par contre, le chlorure de magnésium doit être rigoureusement séparé des sels potassiques employés comme engrais, car il offre de gros dangers pour la végétation. Sa présence dans les minerais de Stassfurt constitue une infériorité par rapport à ceux d'Alsace.

b) GISEMENTS D'ALSACE. — La découverte de la potasse en Alsace date de 1904. Elle a été faite à la suite d'une série de sondages Raky pour la recherche de la houille, au N.-W. de Mulhouse. Le premier sondage qui ait rencontré la couche potassique est celui de *Wittelsheim*, où on a traversé la série des sels entre 358 et 512 mètres ; il a été poussé jusqu'à une profondeur de 1.200 mètres. Des centaines de sondages furent exécutés ensuite pour reconnaître l'extension du gisement.

Le premier puits pour l'exploitation fut foré en 1905-1906 à Wittelsheim; on dut traverser 75 mètres de nappe aquifère par le procédé de congélation. Tant que le pays a été occupé par les Allemands, les exploitations, appartenant en grande partie à des Français, ont été paralysées dans leur développement : avec Stassfurt et l'Alsace, l'Allemagne continuait à posséder le monopole de la potasse et réglementait étroitement le prix de vente du Kali, modique à l'intérieur, élevé à l'exportation.

Après la guerre, trois des groupements miniers furent séquestrés, puis rachetés par le gouvernement français ; seul le groupement français Kali Sainte-Thérèse a conservé son individualité. Depuis ce moment, le gisement n'a pas cessé de prendre de l'importance et commence à concurrencer sérieusement le gisement de Stassfurt avec lequel il a conclu une entente. Ses produits ne renferment pas de chlorure de magnésium et contiennent une plus forte proportion de potasse pure que les sels allemands.

Les couches potassiques se trouvent dans des terrains très différents de ceux de Stassfurt, dans l'*Oligocène inférieur* (Sannoisien).

Leur coupe est la suivante en partant de la surface :

	Marnes et grès calcaires stampiens (marins)	358 mètres épaisseur.
Sannosieni (saumâtre)	*Marnes salifères bigarrées avec anhydrite et sels*	154 mètres »
	3 couches de sel gemme et anhydrite. 3 couches de potasse vers 500 à 800 mètres de profondeur (1) séparées par 20 mètres d'argile schisteuse.	
	Marnes schisteuses avec dolomie et sel gemme .	108 mètres »
	Seconde série d'argiles salifères (sel gemme et anhydrite)	327 mètres »
	Marnes schisteuses stériles	172 mètres »
	Conglomérat sidérolithique (Eocène ?)	

Il y a donc eu deux périodes d'évaporation, l'une qui n'a été poussée que jusqu'à la production du chlorure de sodium, l'autre qui l'a été jusqu'à la formation du chlorure de potassium.

(1) Kali Sainte-Thérèse exploite à 1.050 mètres de profondeur. Jusqu'à 200 mètres on est obligé, pour le forage des puits, d'employer la congélation.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les 2 grandes couches potassiques ont: la couche supérieure, reconnue sur 84 km², 1 m 20 d'épaisseur, pouvant contenir 98 millions de mètres cubes ; la couche inférieure, reconnue sur 172 km², 4 à 5 mètres d'épaisseur, contenant 603 millions de mètres cubes ; au total 1.472.000.000 tonnes de sels, ou 300 millions de tonnes de potasse. Ces couches sont séparées par 20 mètres de petits délits d'argile schisteuse. Le dépôt n'a donc pas été continu. Au-dessus et au-dessous de la zone potassique, existent des couches de sel et d'anhydrite. On trouve, dans ce gisement, des sels différents de ceux de Stassfurt : de la *sylvinite* (chlorure double de potassium et de sodium), tantôt blanche, tantôt rouge, pas hygroscopique, stable, qui n'est pas connue à Stassfurt où il y a simplement de la sylvine (KCl).

Les terrains où se rencontrent les sels, ont subi des mouvements postérieurs très nets. Les couches ont un plongement général vers le Nord qui aboutit à les rendre inexploitables. Elles sont découpées en horsts et graben par des accidents N.E. S.W. suivant le système des Vosges. Les graben trop profonds ne sont pas utilisables. Récemment, on a découvert à Blodesheim, un horst potassique situé à l'Est et les Allemands ont commencé à exploiter au delà du Rhin.

c) AUTRES GISEMENTS. — En dehors de ces gisements, on ne connaît que le gîte de *Kalusz* (Pologne), dans les formations tertiaires de la dépression subcarpathique, le gîte de *Suria* (Catalogne) assez irrégulier, celui-des Etats-Unis dans le permien à *Carlsbad*, près el Paso, à la frontière du Mexique et le gisement russe de *Solikamsk* (sylvinite et carnallite), que sa position géographique déprécie. Des indices de potasse viennent d'être trouvés dans les Landes.

Presque nulle part ailleurs, dans le monde, on n'a rencontré de sels de potassium exploitables. Il est étonnant que l'évaporation n'ait presque jamais été poussée à ce stade ; peut-être a-t-on méconnu les sels de potassium qui ont pu autrefois passer inaperçus.

B. — SODIUM

Toute l'industrie de ce corps a pour base le chlorure de sodium

1. Usages. — Le *sodium métallique* sert, à la fabrication de la soude caustique, du Mg, du Si, de certains produits organiques, de l'antipyrine, de l'aluminium (autrefois), des cyanures, etc... (consommation environ 5.000 tonnes). La *soude caustique* (NaOH) sert dans l'industrie des savons, du papier, le mercerisage du coton, la fabrication de divers produits organiques (acide oxalique, couleurs d'aniline). Le *chlorure de sodium* est employé directement comme aliment et dans de nombreuses industries (vernissage des poteries, mégisserie, engrais, fonte des neiges, grillages chlorurants, salaisons). Le *carbonate de sodium* sert d'intermédiaire dans la fabrication de divers sels de sodium ; il est utilisé pour le blanchissage, la fabrication de l'outremer, de certains verres, pour la concentration du lait, pour la fabrication des eaux gazeuses, l'industrie des conserves, l'extinction des incendies. Le *sulfate de sodium* sert d'intermédiaire dans la

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

fabrication de la soude par le procédé Leblanc ; il est utilisé en pharmacie et pour le dégraissage des laines. Le *sulfite de sodium* est employé dans l'industrie du sucre de betteraves ; l'*hyposulfite de sodium* a des applications en photographie ; l'*azotate de sodium* sert à la fabrication du nitre et comme engrais ; le *borate de sodium* est utilisé pour la soudure, la céramique, les conserves alimentaires.

2. Rôle géologique du sodium. — Le sodium est une substance très répandue dans la nature ; on le trouve dans la plupart des roches avec une teneur sensible (2,70 % en moyenne, ou 3,60 % de soude) ; il est surtout abondant dans les feldspaths sodiques et calco-sodiques qui sont beaucoup plus nombreux qu'on ne le croyait autrefois, ainsi que dans plusieurs autres minéraux.

Il est soluble, plus que le potassium. Aussi y en a-t-il une plus grande quantité dans les eaux (4 fois plus) et la teneur de l'eau de mer en chlorure de sodium est-elle considérable (29 grammes par litre) ; car, en fin de compte, c'est dans la mer que vont s'accumuler tous les résidus continentaux ; une partie en a été restituée dans les gisements de sel gemme.

Le chlorure de sodium se trouve surtout dans la mer dont la salure est croissante avec le temps et dans les terrains sédimentaires où il est un produit d'évaporation. En outre, il est un élément indispensable de la vie cellulaire, aussi bien chez les végétaux que chez les animaux.

3. Minerais . — C'est le *chlorure de sodium* qui est de beaucoup le plus important ; on le rencontre partout en très grandes masses, si bien qu'il ne peut être exploité que dans des conditions de gisements économiques et faciles.

On connaît également, dans les bassins d'évaporation, le *carbonate de sodium* (Natron), les *nitrates de sodium*, les *borates de sodium* et des *sulfates complexes* comme la *glaubérite* ($SO^4Ca + SO^4Na^2$).

CHLORURE DE SODIUM

1. Commerce et statistique. — Le sel existe en telle abondance dans beaucoup de régions, soit à l'état de gisements géologiques (sel gemme), soit sur les côtes de la mer (marais salants), qu'il forme relativement peu un objet de commerce international. La plupart des pays peuvent se suffire en sel. Toutefois il en est, qui, n'ayant pas de mine ou de côte favorable à l'établissement de marais salants, doivent importer tout le sel nécessaire à leur consommation et, dans l'Afrique, le sel a été de tout temps l'objet d'un trafic important. L'industrie des marais salants exige des conditions assez rarement réalisées ; il faut non seulement une certaine chaleur pour l'évaporation, mais aussi une ventilation énergique qui renouvelle les couches d'air au-dessus des bassins ; aussi cette industrie n'est-elle pas possible dans les pays tropicaux. Les résultats les meilleurs s'obtiennent dans l'Ouest de la France, région pourtant pluvieuse, mais exposée à des vents continuels.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

En raison de sa nécessité pour la vie, le sel a été presque de tout temps soumis à des impôts formidables (gabelle) qui ont suscité autrefois de violentes récriminations peu à peu assoupies et qui jouent encore un rôle dans les révoltes récentes de l'Inde. Le sel d'alimentation est ainsi grevé d'un droit fiscal représentant 6, 7,... 10 fois le prix de la matière : droit exorbitant que ne peut supporter le sel industriel. Celui-ci, pour en être exempt, doit être « dénaturé » au moyen de substances difficiles à enlever et qui le rendent impropre à la consommation.

La France se suffit à elle-même et exporte en Belgique et en Hollande. L'Angleterre a une exportation considérable, facilitée par la nécessité du fret pour les navires, à Newcastle et Liverpool. Le Scandinavie, la Suisse doivent importer leur sel. En Asie Centrale et en Afrique, d'énormes transports de sel se font par caravanes ; on y échangeait autrefois cet aliment contre des marchandises précieuses (poudre d'or, d'étain, etc...).

Le tableau suivant donne les principaux producteurs de sel, en 1929 :

Etats-Unis	7.750.000 tonnes	
Allemagne	3.900.000 »	(1.900.000 en 1923).
Chine	2.400.000 »	
Grande-Bretagne	2.000.000 »	
Inde anglaise	1.700.000 »	(1.120.000 en 1925).
Russie	2.600.000 »	
France	2.200.000 »	(1.600.000 en 1928).
Italie	910.000 »	(1.000.000 en 1927).
Japon	640.000 »	(en 1928).
Espagne	1.000.000 »	(720.000 en 1923).

La production mondiale totale s'élève à environ 29.000.000. tonnes.

En France, les principales mines de sel se trouvent dans l'Est (Doubs, Meurthe-et-Moselle) ; il y en a quelques-unes dans les Basses-Pyrénées. Leur production dépend de la température qui règle celle des marais salants : les conditions sont meilleures pour elles, s'il a beaucoup plu.

2. Gisements de sel gemme. — Il existe nombre de gisements géologiques qui ont des dimensions colossales. Ils se sont surtout produits *après les périodes de plissements* ; on les trouve le long des chaînes :

Calédonienne	d'âge siluro-dévonien
Hercynienne	d'âge permo-triasique
Alpine	d'âge tertiaire

Les gisements sont d'autant mieux conservés qu'ils sont plus récents.

Leur dépôt se continue encore de nos jours dans les régions désertiques.

On a expliqué la formation du sel par le dépôt dans des lagunes, séparées de la mer par des barres (voir : généralités). Il est possible aussi qu'il y ait eu, dans des régions sans écoulement à climat désertique, des bassins de concentration où se déposaient des matières salines et où des communications avec la mer pouvaient avoir lieu à certaines époques ; quelque chose d'analogue aux chotts actuels.

La plupart des gisements de sel semblent se rattacher à des sortes de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

transgressions restées horizontales. Un certain nombre toutefois, qui se sont trouvés faire partie de zones influencées par les mouvements ultérieurs, ont été fortement plissés. Dans un phénomène de plissement, le sel et l'argile connexe se comportent différemment ; alors que l'argile se plisse, le sel se broie ; mais, comme il arrive pour la glace, les particules de sel se ressoudent en une masse compacte qui épouse les vides du terrain : il en résulte des formes de pointement salins, d'apparence intrusive, discontinus, localisés sur les anticlinaux (plis diapirs). Ces formes ont fait naître, pour la genèse du sel, des théories éruptives, auxquelles la relation fréquente du sel avec des pointements éruptifs ophitiques (dans les Pyrénées, dans l'Afrique du Nord) a pu sembler fournir un argument, mais qui ne résistent pas à un examen plus attentif.

I. — SEL SILURO-DÉVONIEN

Aux environs du *lac Huron*, au *Canada*, on connaît des couches de sel dans le Silurien, ayant de 30 à 40 mètres, quelquefois 80 mètres ; elles sont en relation possible avec les pétroles de la région (Oil Spring).

Aux *Etats-Unis*, une grande partie du sel est fournie par des sondages allant atteindre les dépôts salifères siluriens ou dévoniens sur le bord de la grande plate forme primitive.

En *Russie*, une zone salifère dévonienne, associée au pétrole, a déjà été signalée dans la région du *Timan*. On la retrouve dans toute la plateforme d'*Irkoutsk* en *Sibérie*.

II. — SEL PERMO-TRIASIQUE

On trouve le sel dans toute une série de niveaux qui s'échelonnent du Permien au Keuper :

Dans le Permien supérieur (zechstein) : en Russie (gouvernement de Perm) ; dans l'Allemagne du Nord, notamment à Stassfurt ;

Dans le Trias inférieur (Grès bigarré) : dans la Haute-Saône ;

Dans le Trias moyen (Muschelkalk) : dans le Wurtemberg ;

Dans le Trias supérieur (Keuper) : en Franche-Comté, dans la Salzkammergut, au Tyrol, dans les Pyrénées, en Lorraine, dans le Cheshire. C'est ce niveau du Keuper qui est le plus important de tous les niveaux salifères permo-triasiques. D'une façon générale, en Europe continentale, les gisements salins permo-triasiques sont d'autant plus récents qu'ils sont plus occidentaux.

Russie. — Le bassin du *Donetz* a pris un grand développement depuis quelques années. Le sel y est associé à du gypse et à de l'anhydrite en dépôts sensiblement horizontaux.

On trouve les mêmes dépôts salifères dans le N.-E. de la Russie en allant *vers Perm*. Il y a là 30 à 40 mètres de sel divisé en plusieurs bancs avec des alternances d'argile et d'anhydrite.

La production du sel en Russie (1,7 à 2 millions de tonnes avant la guerre) est alimentée aussi par des lagunes sur la périphérie de la mer Caspienne et dans les régions sibériennes.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Salzkammergut. — Les niveaux salifères y sont très développés ; beaucoup de pays en tirent leur nom (en Hall et en Salz), comme *Hallein, Hallstadt, Halle, Salzburg,* etc... Les terrains y sont très plissés ; ils appartiennent au Permien, au Jurassique, au Crétacé, à l'Eocène ; au milieu de ces zones, généralement presque parallèles, on retrouve des lambeaux de Trias amenés par des accidents tectoniques.

Une coupe montrerait que ce sel se trouve dans le Muschelkalk entre les couches de Saint Cassian et les dolomies du Schlern. On l'y exploite au moyen de grandes chambres, dans lesquelles on fait arriver de l'eau qui dissout le sel ; on pompe cette eau et on l'évapore. Il y a association avec du gypse et de l'anhydrite. Le sel a souvent un aspect laminé et fibreux. Les gisements ont des formes très variées, attribuables aux actions mécaniques qu'ils ont subies.

Doubs et Jura. — Les terrains salifères y sont exploités au moyen de sondages, qui partent du Lias (Calcaire à Gryphées arquées), pénètrent dans l'Infralias et vont chercher les couches de sel vers 150 à 200 mètres de profondeur. Il y a quelquefois des surprises désagréables quand on rencontre des sels magnésiens (kiesérite) qui donnent une matière dure, empâtant le trépan. D'une façon générale, les sondages pratiqués sur les synclinaux ont donné des résultats plus favorables que les autres ; car, au fond des synclinaux, se rassemblent des eaux, apportant le sel qu'elles ont parfois recueilli à de grandes distances.

Lorraine. — Les couches y sont régulièrement inclinées, mais non plissées ; les dépôts de sel y ont l'allure de lentilles, séparées par des lits d'argile ; on en compte 7 ou 8, quelquefois 11 comme à Varangéville (St-Nicolas), où l'épaisseur totale du sel atteint 63 mètres, répartie sur une hauteur totale de 87 mètres ; l'épaisseur de la couche principale est de 21 mètres.

Ce sel est associé à du gypse, qui est probablement dû à une hydratation postérieure d'anhydrite.

L'exploitation se fait tantôt par minage souterrain, tantôt par grandes chambres de dissolution. Elle donne naissance à des industries connexes : raffinage du sel, carbonate de soude, verrerie (Dombasle, Rosières, Varangéville, Portieux, etc...).

Cheshire (*Angleterre*). — Il existe une grande zone de terrains triasiques qui prend en écharpe toute l'Angleterre du N.-E. au S.-W., depuis Newcastle jusqu'à Plymouth, séparant la région des terrains secondaires à l'Est de celle des terrains primaires à l'Ouest. Les principales exploitations se trouvent au voisinage de la mer, dans les régions de *Durham* et de *Liverpool* et, en particulier, à *Chester* (*Cheshire*).

Les gisements de sel forment un énorme bassin souterrain entre des couches d'argile qui y maintiennent de l'eau salée sous pression. Celle-ci remonte, soit dans des sources naturelles ou wiches (Northwich, etc...), soit grâce à des forages artificiels. Le sel étant ainsi éliminé de la profondeur, il se produit des tassements. On admet que la couche de sel a 32 kilomètres × 24 kilomètres de surface et 45 mètres d'épaisseur. Cela donnerait 34 milliards de mètres cubes et 80 milliards de tonnes. Une partie seulement de cet énorme cubage est d'ailleurs disponible ; le reste

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

est au-dessous du niveau de la mer ou bien a été déjà enlevé par dissolution. Les ressources d'avenir sont cependant énormes.

Pyrénées. — Il s'y trouve un grand nombre de petits pointement gypso-salins apparaissant d'une façon bizarre en association avec des marnes bariolées et avec des ophites et sur lesquels on a placé récemment beaucoup de sondages infructueux pour chercher du pétrole. On les exploite notamment à *Salies-de-Béarn.*

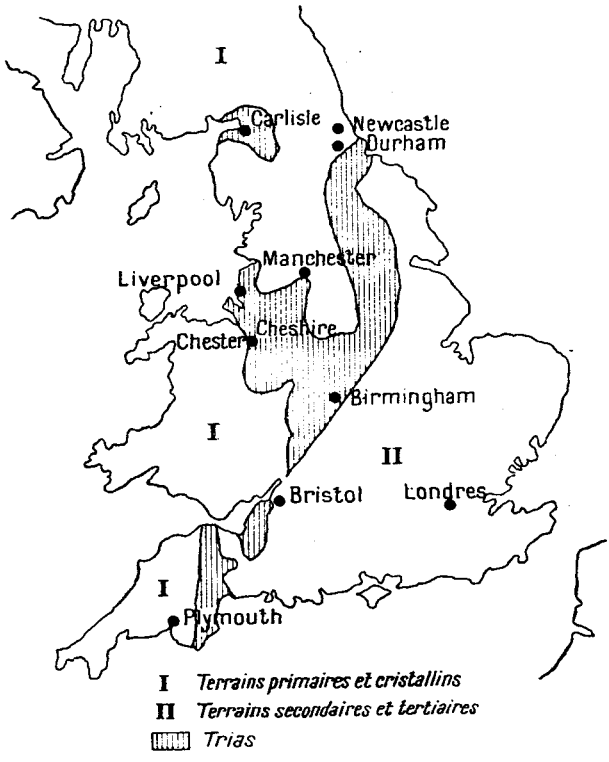


Fig. 74. — Carte du Trias d'Angleterre.

Catalogne. — Sur le versant Sud des Pyrénées, en Catalogne, existent quelques gisements salins assez développés, notamment à *Cardona* (province de Lérida) et à *Suria.* On les rattache hypothétiquement au Trias. Ils se présentent en dômes anticlinaux, plissés sous l'Oligocène et qu'on a parfois considérés comme éocènes. Dans toute la région on trouve, sous les grès et marnes oligocènes, des rochers de sel gemme.

Algérie. — Le type du Trias gypso-salin, rencontré dans les Pyrénées, existe aussi sur toute la longueur de l'Algérie avec des dispositions anormales : tels sont le rocher du *Khang-el-Melah* (massif de sel raviné pointant au milieu du Crétacé) et la montagne de sel d'*El-Outaïa.*

Sud-Est de l'Asie. — Dans le *Se-Tchouan,* le *Yunnan,* le *Cambodge,* le *Laos,* des plis d'âge carbonifère font affleurer tous les terrains jusqu'au

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Dinantien ; au-dessus se trouvent en transgression des terrains d'âge variable (terrains rouges infra-jurassiques et salifères) ayant les mêmes caractères et le même aspect qu'en Europe. Dans le Se-Tchouan, en même temps que le sel, il existe souvent du pétrole ou un peu de gaz combustible. Le pétrole forme une sorte de nappe au-dessus de l'eau salée dont on le sépare par une décantation sommaire. Les gaz combustibles sont souvent plus bas, vers 7 à 800 mètres de profondeur. Le puits le plus profond qui en ait fourni avait 1.000 mètres.

III. — SEL TERTIAIRE

Les chaînes tertiaires sont jalonnées par une série de gisements salins. On en connaît en *Espagne*, à *Remolinos* près Saragosse ; tout le long de la chaîne alpine ; en *Alsace*, dans les *Apennins*, en *Toscane*, en *Sicile*. Mais les plus importants se trouvent le long de la région carpathique.

Carpathes. — Les gisements constituent des amas, où des phénomènes de plissements sont très nets ; ceux-ci sont peut-être accidentels, mais il est possible qu'ils soient dus à l'affaissement progressif des synclinaux

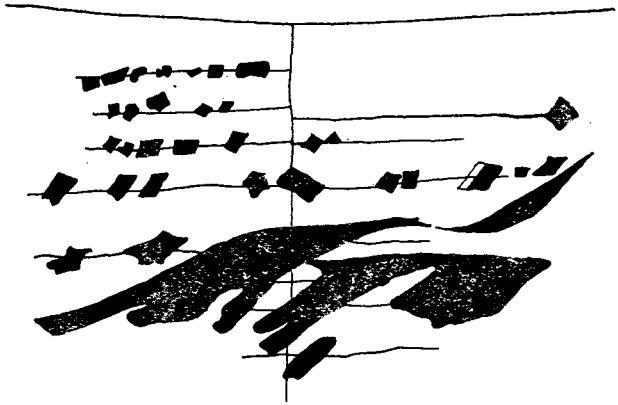


Fig. 75. — Coupe verticale théorique du gîte de Wieliczka.

pendant le dépôt du sel. Les gisements appartiennent surtout à la phase du *Schlier* (Burdigalien-Helvétien), pendant laquelle s'est produite une régression déterminant le dépôt d'argiles très fines micacées, avec intercalations de sel et probablement d'hydrocarbures. Après cette période, le retrait s'est encore accentué et on trouve, par exemple, en Basse-Autriche, des dépôts avec plantes terrestres.

a) Les gisements sont très développés en *Galicie* où existe la plus ancienne exploitation, la mine de *Wieliczka*, surtout connue des touristes. En profondeur, le gîte montre un ensemble relativement régulier de couches ; mais, plus haut, on ne trouve plus que des blocs de sel, parfois

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

énormes, épars dans les argiles ; ils résultent de la dislocation de couches analogues aux couches inférieures par des accidents tectoniques.

On y distingue le *Szibicasalz*, sel cristallin à gros éléments grisâtres ; le *Spizasalz*, sel à grain très fin ; le *Grünsalz*, sel gris vert, avec nombreuses inclusions, formant la plupart des blocs de la partie supérieure.

Malgré leur dislocation, ces blocs présentent une apparence stratifiée. On y voit des bancs de sel plus ou moins continus, reliés par des cassures également remplies de sel (fig. 76) s'y étant introduit et y ayant cristallisé postérieurement.

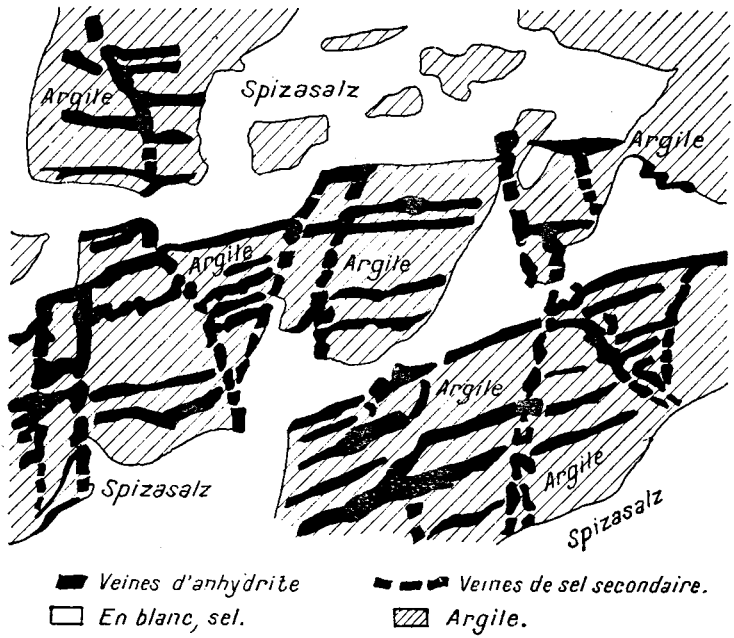


Fig. 76. — Coupe théorique d'une paroi à Wieliczka, montrant l'apparence stratifiée dans les blocs isolés de la formation supérieure.

Ce gîte est bien étudié ; on connaît son âge avec précision (calcaire de la Leitha), grâce à de nombreux fossiles.

b) En *Roumanie*, les couches sont plus développées et offrent un caractère plus grandiose. Les masses de sel présentent des dimensions énormes ; il s'agit d'un sel très pur qu'on exploite par grandes chambres de 40 à 50 mètres en tous sens. On l'enlève par grandes barres, en partant d'une rainure centrale.

Les gisements se trouvent sur les deux versants des Carpathes moldaves, notamment en *Transylvanie* (Marmaros, Maros-Ujvar). Il y a des dégagements de gaz carburés. A Maros-Ujvar, le gîte prend l'allure d'un pointement éruptif : le sel pointe en masse compacte au milieu d'argiles tertiaires ; la masse de sel va en s'élargissant en profondeur, en même temps que ses parois, verticales en haut du gisement, se rapprochent peu à peu

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

de l'horizontale vers le bas. On est nettement en présence d'un anticlinal rompu. On distingue assez difficilement la schistosité du sel.

Asie. — On connaît des dépôts de sel en *Asie-Mineure* (le long du fleuve Halys), dans le Sud de la *Perse*, dans le *Turkestan*, dans l'*Inde*.

Ces derniers, situés dans la *Salt Range* au N.-W. du Pendjab, ont été très discutés au point de vue de leur âge ; la stratigraphie y est effectivement difficile ; il y a là deux zones salifères, l'une tertiaire, l'autre que l'on croyait silurienne (salt-marls) ; en réalité des phénomènes de charriage ont amené celle-ci dans des positions stratigraphiques anormales.

Les affleurements sont énormes (gorges de Bhadur-Khel) ; on y trouve des falaises de sel qui paraissent peu solubles à l'air.

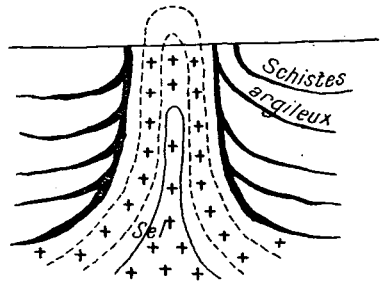


Fig. 77. — Schéma d'un dôme de sel anticlinal à Maros-Ujvar.

Golfe du Mexique. — Dans les régions plissées où se trouvent les pétroles du *Texas*, on rencontre des régions salifères, peu importantes au point de vue industriel, mais ayant un certain intérêt à cause de la connexité du sel, du soufre de Louisiane et des pétroles du Texas.

IV. — SEL ACTUEL

Des phénomènes analogues à ceux qui ont amené la production du sel aux époques géologiques se produisent encore de nos jours dans les régions désertiques. Ils peuvent se diviser en trois (1) :

1° Evaporation récente d'une mer isolée du reste des Océans ;

2° Dissolution des terrains géologiques salifères et concentration dans un bassin sans écoulement ;

3° Concentration des eaux dites douces dans un bassin fermé sans écoulement.

1° Evaporation d'une mer récente. — On connaît des régions salifères de cette nature dans toute la *Sibérie*, aussi bien au Nord du chemin de fer transsibérien qu'au Sud où elles se développent beaucoup ; la salure y croît du Nord vers le Sud.

La *zone aralo-caspienne* formait à l'époque pontienne une grande mer qui reliait la Caspienne, la mer Noire et le lac d'Aral actuel. Des phénomènes de concentration des eaux s'y sont produits avec des alternatives diverses. Il y a eu une phase où le lac d'Aral se trouvait à un niveau plus haut qu'actuellement, une autre où il était à un niveau plus bas. Il y a donc eu une série d'oscillations dues à des modifications dans le climat. Ce phénomène est peut-être aussi en relation avec l'existence de compartiments du sol, susceptibles de s'affaisser au-dessous du niveau de la mer,

(1) Il faut noter aussi que les nuages et les brouillards peuvent transporter une quantité assez notable de sel ; mais cette cause paraît jouer un rôle insignifiant dans la formation des roches salifères.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

comme le sont actuellement le bassin aralo-caspien et la région de l'Asie-Centrale.

Les mêmes phénomènes ont activé la concentration des matières salines qui s'est produite, en particulier dans l'*Asie Centrale*, dans le *Thibet*, dans le désert de *Sistan* (*Perse*), dans le *Turkestan russe*.

2° DISSOLUTION DES TERRAINS GÉOLOGIQUES SALIFÈRES. — Les phénomènes d'évaporation d'eaux ayant pris leur sel à des terrains géologiques plus anciens (gisements triasiques du voisinage), s'observent dans les Chotts d'*Algérie*. L'origine triasique du sel peut se déduire du fait que certains Chotts sont constitués par de l'eau douce.

3° CONCENTRATION D'EAU DOUCE DANS UN BASSIN FERMÉ. — Elle s'est produite dans le *Grand Lac Salé* de l'*Ouest-Américain*. Là, en effet, il n'y a ni traces d'anciennes mers, ni traces d'anciens terrains salifères. Le niveau du Grand Lac était autrefois à 300 mètres au-dessus du niveau actuel ; par suite de l'évaporation progressive des eaux, on est arrivé à avoir une teneur en sel, assez forte. La salure de la *Mer Morte*, alimentée par le Jourdain et sans écoulement, a une origine analogue.

3. Marais salants. — Ainsi qu'il a été dit plus haut, cette industrie ne peut se développer que dans les pays de climat sec et de grands vents.

La production par hectare et par an est :

Portugal (Sétubal)	250 tonnes.	
Sardaigne (Cagliari)	120 »	
Camargue	100 »	(à cause du courant d'air de la vallée du Rhône).
Ouest de la France	25 à 30 tonnes.	

En Algérie ou au Sénégal, cette industrie est à peu près impossible.

La production des marais salants est extrêmement variable selon les années ; il en résulte que les conditions atmosphériques de la saison d'été ont, en favorisant ou arrêtant la production des marais salants concurrents, une importance extrême pour les mines de sel gemme elles-mêmes.

SULFATE DE SODIUM

On trouve, dans divers terrains géologiques, quelques gisements de *glaubérite* ($SO^4Ca + SO^4Na^2$), en particulier en *Espagne* (*Cien-Pozuelos*, les Cents Puits, sur le plateau de Madrid).

Le Miocène est là à l'état d'argiles versicolores où s'intercalent quelques bancs de glaubérite (10 à 12 mètres), puis à l'état de calcaire d'eau douce. On extrait en carrière et on soumet à un lavage. Le sulfate de sodium, plus soluble, se sépare du sulfate de calcium ; ensuite on l'obtient par évaporation.

CARBONATE DE SODIUM

Le *natron* ou *trona* ($CO^3Na^2 + nCO^3NaH$) est un produit superficiel efflorescent qui se dépose par évaporation de petits lacs salés. Sa forma-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

tion a été expliquée par la réaction du sel marin sur le carbonate de calcium qui constitue le sol des lacs salés.

On trouve ainsi dans l'Ouest de l'*Egypte*, vers la Cyrénaïque (*El Natroun*), une série de petits lacs sans écoulement où se forme en été une croûte très dure de carbonate de sodium.

De même sur la *côte des Somalis* italienne.

En *Californie*, des cuvettes lacustres contiennent des étendues considérables de carbonate de sodium sur le bord ; on rencontre du chlorure de sodium au centre.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XVI

LITHIUM

1. Usages. — Le lithium a des usages très limités : en thérapeutique, dans la métallurgie (alliages avec l'aluminium, le plomb et l'étain) et dans la composition de divers révélateurs photographiques. La consommation annuelle est seulement de quelques centaines de kilogrammes. En raison de sa rareté, il est très recherché malgré ses emplois restreints, et ses prix sont élevés : il s'est vendu longtemps 40 à 50 francs le kilogramme et, en 1914, il valait encore 15 francs-or.

2. Minerais. — On le trouve dans le groupe des *granulites à mica blanc*, dans un assez grand nombre de minéraux où le lithium remplace le sodium et le potassium : par exemple dans les feldspaths (orthose), dans le *mica lépidolithe* (4 à 6 % de lithium) ; dans certains silicates alumineux comme le *triphane* (5,5 %) et le *castor* (2 1/2 à 4 %) ; dans la *tourmaline* ; enfin et surtout dans des phosphates comme l'*amblygonite*, $2Al^2P^2O^8 + 3$ (Li, Na) Fl, qui constitue le minerai le plus important de lithium (8 à 10 %).

On n'exploite industriellement que le lépidolithe et l'amblygonite (assez rare).

Les eaux minérales des régions granitiques renferment également un peu de lithine.

3. Gisements. — L'association du lithium avec les granulites à mica blanc entraîne son rapprochement avec l'étain.

I.) Amblygonite. — A *Montebras* (*Creuse*), l'amblygonite se trouve dans les conditions ordinaires des minerais stannifères et est associée à eux. Un certain nombre de filons sont encaissés dans des granulites et des pegmatites où l'amblygonite accompagne la cassitérite, le quartz et le mica. L'amblygonite a un aspect un peu cireux, un peu violacé ; elle est exploitée tantôt comme minerai de lithine, tantôt comme phosphate pour obtenir certaines colorations vitrifiables, rouges et jaunes ; elle s'accompagne souvent de turquoise. On connaît quelques autres gisements du même minéral, par exemple dans le *Dakota* (*Etats-Unis*) t à *Arendal* en *Norvège*.

II.) Lépidolithes. — Des *lépidolithes* se trouvent parfois dans des

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

granulites ou sur des haldes de gisements stannifères : à *Saint-Sylvestre* (*Haute-Vienne*), en *Moravie*, dans le Nord du *Portugal*. Ils sont caractérisés par leur couleur violette.

III.) TRIPHANE. — On exploite du triphane aux Etats-Unis (*Keystone*, dans le *Dakota*).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XVII

CALCIUM

1. Usages. — Le calcium intervient dans la composition d'un grand nombre de produits utiles : la *chaux caustique*, CaO, employée pour la fabrication du mortier, la préparation des peaux, la défécation des jus sucrés; le *chlorure de calcium*, $CaCl^2$, utilisé comme déshydratant ; l'*hypochlorite de calcium*, employé pour le blanchiment et la fabrication des toiles peintes; le *fluorure de calcium*, $CaFl^2$, étudié à propos du fluor; le *carbonate*, CO^3Ca, formant l'élément principal des pierres de construction, des marbres, de la craie, de la pierre à chaux, des blancs d'Espagne, de la pierre lithographique, etc.; le *sulfate*, SO^4Ca, constituant le plâtre et l'albâtre; les *phosphates*, étudiés à propos du phosphore.

Les minerais utiles qu'il nous reste à examiner sont le *carbonate* et le *sulfate*.

2. Rôle géologique. — Le calcium intervient dans la constitution des roches suivant une proportion moyenne de 3,5 %, soit 4,8 % de chaux. Cette chaux est surtout à l'état de silicates. Mais les roches calciques, soumises à l'altération, donnent des combinaisons avec l'acide carbonique de l'air et le soufre des pyrites ; il se forme des carbonates et des sulfates solubles qui sont reprécipités sous des influences diverses, notamment sous celle des organismes.

CARBONATE DE CALCIUM

A cette catégorie appartiennent toutes les roches calcaires.

1. Pierres de construction calcaires. — Ce sont les calcaires qui constituent la plus grande partie des pierres de taille utilisées en France. La pierre de construction est fournie, dans le bassin de Paris, par le Jurassique, le Crétacé et le Tertiaire. Les roches jurassiques donnent les qualités les plus recherchées ; les roches crétacées, plus friables, sont peu employées, tout au moins à Paris, Les calcaires tertiaires sont très utilisés.

Les qualités des calcaires tiennent : à leur *composition chimique*, d'une part; à leur *structure*, d'autre part. Les calcaires contiennent toujours

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

une certaine proportion de silice, d'oxyde de fer, de carbonate de magnésium et d'argile. La proportion d'argile devient manifeste, lorsque le calcaire est soumis à l'altération. Elle influe notamment sur la résistance à l'écrasement.

Le poids varie de 1.400 à 2.800 kilogrammes par mètre cube et la résistance à l'écrasement est à peu près proportionnelle à la densité. La pierre pesant de 2.100 à 2.800 kilogrammes porte environ 1.200 kilogrammes par centimètre carré, alors que la pierre tendre, dont le poids varie de 1.400 à 2.100 kilogrammes, ne résiste qu'à 200 ou 220 kilogrammes par centimètre carré.

Une bonne pierre est résistante, dense et facile à travailler. Elle doit pouvoir donner des blocs d'une certaine dimension. On distingue quelquefois les pierres tendres sciables à la scie à dents et les pierres dures non sciables.

La gélivité est un sérieux défaut de la pierre ; elle dépend de sa porosité ; on la détermine en trempant la pierre dans une solution saturée et bouillante de sulfate de soude. L'effet lent de la gelée est ainsi remplacé par l'effet rapide de la cristallisation du sulfate.

On distingue aussi les *pierres de libage* (vilaine couleur et grain grossier) et les *pierres nettes*.

Au *point de vue géologique* les calcaires français se classent ainsi :

Toarcien. — Calcaire de *Thouars* ; pierre à ciment de *Wassy* ;

Bajocien. — Calcaires de l'*Ardenne* (Chémery, Dom-le-Mesnil), *Nièvre* (Le Guétin), *Vienne* (Chauvigny).

Bathonien. — Pierre de *Caen* (calcaire fin, régulier, propre à la sculpture, ayant une grande réputation et ayant servi à construire de nombreux édifices gothiques, comme la Cathédrale de Canterbury et la Cathédrale de Cologne). Pierre de *Dôle* (Jura). Calcaire de *Comblanchien* (Côte-d'Or).

Callovien. — Calcaire de *Pougues* (Nièvre).

Oxfordien. — Pierre d'*Euville* (Meuse), employée pour la construction des Tuileries à Paris. Pierre de *Lérouville* de qualité inférieure.

Séquanien. — Région de *Dôle* avec carrières en bordure du Canal du Rhône au Rhin : pierre employée à Paris pour la construction de la Trinité, du Pont Saint-Michel, etc. Région de *Tonnerre* : pierre compacte, homogène, en dalles minces.

Portlandien. — Bas-Boulonnais. (Pierre à bâtir).

Crétacé. — Il s'agit généralement de craie plus ou moins tendre s'écrasant facilement et n'ayant que des usages locaux : Turonien de *Touraine* (Craie Tuffeau ayant servi à construire les châteaux de la Loire). Dans le Sud-Ouest de la France, on trouve dans le Turonien des pierres beaucoup plus dures : Calcaire de *Chancelade*.

Dans l'Emschérien : Pierre de *Sens*, de *Champagne* et de *Picardie*.

Tertiaire. — Calcaire grossier du *Soissonnais* : pierres à liards ou à Nummulites ; calcaires à verrains ou à Cérithes géants. Calcaires bartoniens de *Saint-Ouen* pour l'empierrement. Meulières de *La Ferté-sous-Jouarre*. Calcaire oligocène de *Château-Landon* (employé pour l'*Arc-de-Triomphe*). Calcaire de *Beauce*.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

2. Pierres à chaux et à ciments. — La *pierre à chaux* doit contenir une certaine proportion d'argile. Selon les cas, on a les produits suivants :

Moins de 5 %	Chaux grasse.
De 5 à 12 %	Chaux maigre, sans liant.
De 12 à 20 %	Chaux hydraulique, susceptible de durcir sous l'eau.
De 20 à 25 %	Produits variables qui tombent en poussière; mais, en les cuisant à une température assez élevée, on a les chaux-limites ou ciments de Portland à prise lente.
De 25 à 30 %	Ciments romains à prise rapide.
40 %	Pouzzolanes artificielles.

La fabrication de la *chaux hydraulique* n'exige qu'une installation fort simple.

Le *ciment artificiel à prise lente* peut se faire avec la plupart des calcaires, tenant moins de 4 % de dolomie. A *Boulogne*, le calcaire employé pour la fabrication des ciments tient 12 à 25 % d'argile. On y ajoute un peu de chaux. A la *Grande-Chartreuse*, on emploie un calcaire bitumineux riche en argile. L'installation de la fabrication des ciments est très délicate.

Le *ciment à prise rapide* est fabriqué à *Wassy*, dans l'Yonne, et à *Grenoble* (Porte-de-France). Le calcaire de Wassy tient 3 % SO^4Ca. Le calcaire de la Porte-de France (Grenoble) tient 4 % SO^4Ca. Le SO^4Ca, semble jouer un rôle dans les qualités du ciment.

3. Blanc d'Espagne. Craie. — On emploie, à cet effet, les calcaires crayeux fins du Sénonien inférieur (Emschérien) et du Sénonien supérieur (Aturien). La craie traçante est exploitée à *Meudon* (Seine), *Bougival*, *Mantes* (Seine-et-Oise), *Châlons* (Marne) et à *Canteleu*, près de Rouen (Seine-Inférieure). On l'emploie pour la fabrication du blanc de Meudon, du blanc d'*Espagne* : dans ce but, la craie est pulvérisée, soumise à une lévigation et agglomérée.

4. Pierres lithographiques. — Les pierres lithographiques sont employées pour la gravure. Cette industrie a subi une crise due au développement des procédés de zincographie, de photogravure, etc. La lithographie n'a plus guère d'importance que pour certains travaux d'art, notamment pour le tirage des affiches illustrées, qui exigent d'ailleurs des pierres de grandes dimensions.

Malgré l'abondance des calcaires lithographiques ou plutôt sublithographiques, les qualités exigées sont rarement réalisées. Ausssi la plupart des exploitations sont-elles tombées et *Solenhofen* a-t-il maintenant un véritable monopole. On en connaît cependant un peu dans le *Gard* et à *Diano-Marina* (Italie). Il faut, en effet, la réunion des qualités suivantes :

1° La pierre doit être compacte avec un commencement de cristallinité, mais pas trop, car l'encre ne prendrait pas ;

2° Elle doit être absolument homogène avec 5 à 6 % de silice et d'argile et une teneur sensiblement égale en silice et en argile. S'il y a trop de silice, la pierre est dure et fragile ; s'il y a trop d'argile, elle est trop tendre ;

3° Elle ne doit pas contenir de fissures cachées. On se rend compte de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

la réalisation de cette condition en soufflant sur la pierre. La buée laissée par l'haleine se rétrécit en ellipse s'il existe une fissure. En particulier, la pierre ne doit pas contenir de fissures de retrait avec des cristallisations de calcite qui ne prendraient pas l'encre. Les fissures compromettent d'ailleurs la résistance de la pierre à l'écrasement sous la presse.

Les calcaires lithographiques ont été métamorphisés et plissés. Aussi es conditions sont-elles difficilement réalisées, surtout en plaques de grandes dimensions.

Gisement de Solenhofen (*Bavière*). Les conditions sont exceptionnellement favorables. On a des bancs de calcaire portlandien remplissant des dépressions au sommet des dolomies kimméridgiennes. L'épaisseur totale du calcaire portlandien peut atteindre 25 à 30 mètres. Les couches utilisables, assez irrégulières, forment des bancs peu épais, de 16 à 18 centimètres, à grains très réguliers. Tout l'étage contient des empreintes de fossiles, même mous, dans un admirable état de conservation.

Le grain très fin dénote une sédimentation particulièrement tranquille.

Le Portlandien forme un plateau coupé de vallées, ce qui permet un grand développement du front de taille avec des couches se présentant bien pour l'exploitation.

On met les bancs à nu ; on trace dessus les plans de sciage, suivant lesquels on débite et on procède au polissage (1.200 ouvriers).

5. Marbres. — Quand la cristallisation du calcaire est plus complète, on a affaire à des marbres, c'est-à-dire à des roches susceptibles d'être polies.

Leur valeur est variable suivant leur couleur, leur transparence, leur mode de polissage. Les marbres blancs, assez rares, sont ceux qui ont la la valeur la plus grande ; celle-ci varie d'ailleurs suivant la façon dont ils se patinent avec le temps. Les marbres blancs statuaires antiques provenaient de Paros, du Mont Pentélique, etc. ; ils prenaient à la longue une patine chaude et belle. Les marbres statuaires modernes proviennent surtout de Carrare, ils ont généralement une couleur bleuâtre moins artistique. Tous les marbres statuaires doivent tenir de leur cristallinité un grain, ni trop fin, ni trop gros.

a) **Classification.** — Les marbriers classent les marbres de la manière suivante :

1° Marbres simples.

Blancs : Paros, Pentélique, Carrare et Vermont (Etats-Unis). Il faut y ajouter les albâtres calcaires d'Algérie dont la valeur est très inférieure.

Noirs : ce sont les plus fréquents : noir antique (parsemé de petites taches blanches) ; Petit Granite ; Sainte-Anne (Belgique) ; Portor (fond noir à fissures jaunes).

Rouges : antique (Grèce) ; griotte (Pyrénées), à fond brun ou rouge ; Sarancolin, à fond jaune avec taches rouges ; marbre incarnat (à polypiers), grandes taches rouges ;

Colorés : bleu turquin (Italie) ; jaune antique ; jaune de Sienne ; vert antique (Thessalie) ;

2° Marbres brèches, formés de fragments soudés donnant un effet ornemental : jaune fleuri, rose fleuri, brocatelle d'Espagne ;

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

3° MARBRES COMPOSÉS (à veines nombreuses) : classe qui comprend aussi des matières non calcaires comme les serpentines, les talcs et même les porphyres, etc. : Campan ;

4° LUMACHELLES formées de coquillages, susceptibles d'un poli médiocre ;

5° ONYX : produits d'eaux chaudes récentes. Variétés siliceuses et variétés calcaires : celles-ci existent surtout au Mexique et en Algérie ; translucides (Balustrade du Grand Escalier de l'Opéra).

b) **Distribution géographique des marbres.** — En **France** : Au point de vue de l'industrie extractive des marbres, la France est un pays riche :

1° GROUPE DU NORD : marbres primaires des Ardennes, de la Meuse, du Nord, du Pas-de-Calais (Boulonnais), qui fournissent des variétés foncées, noires, grises, rouges (Marbre Napoléon, marbre lunelle) ;

2° GROUPE DES PYRÉNÉES, le plus important : Saint-Béat, Campan, Griottes ;

3° GROUPE DE L'OUEST : Sarthe, etc. ;

4° GROUPE DU CENTRE : Morvan, Massif Central, etc. ;

En **Algérie**, il se trouvait de nombreuses exploitations romaines, reprises récemment : marbre statuaire de Filfila ; onyx en bancs très irréguliers ayant donné lieu, malgré la valeur des produits, à des mécomptes industriels.

En **Italie**, les principaux centres sont les énormes carrières de Carrare et Serravezza.

En **Grèce**, on a repris les carrières antiques de Paros, du Pentélique, de Naxos, de Syra.

En **Norvège**, dans l'**Inde** (aux environs de Delhi), au **Canada**, aux **Etats-Unis** (Carrières de Vermont), se trouvent aussi des marbres renommés.

Au **Mexique** existent des carrières d'onyx.

c) **Synthèse.** — Le marbre aurait été obtenu synthétiquement dans la célèbre expérience de Hall, difficile à reproduire et encore douteuse aujourd'hui.

d) **Formation.** — Les marbres sont des calcaires métamorphisés, ayant subi souvent des actions dynamiques, qui ont provoqué la formation des cassures. Ces cassures se sont remplies de carbonate de chaux cristallisé par une action de transport secondaire par l'eau, ayant produit finalement des veines blanches sur fond coloré.

Certains marbres, givétiens et frasniens par exemple, sont très riches en débris organiques, polypiers, etc.

e) **Age des marbres.** — On trouve des marbres dans les assises les plus variées : cependant, ils sont plus abondants dans les terrains anciens, ayant subi un métamorphisme.

1° SILURIEN. — Bagnères-de-Luchon (Pyrénées) ;

2° DÉVONIEN. — Dans le Givétien des Ardennes (marbre Sainte-Anne, marbre Charlemagne) ; dans le Frasnien des Ardennes (rouge de Flandres) ; dans le Frasnien du Boulonnais (calcaire de Ferques) ; dans la Mayenne ;

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

dans la rade de Brest ; dans le Morvan (Diou) ; dans le Languedoc (Cabrières) ; dans les Pyrénées (griottes manganésifères ; Campan) ;

3° CARBONIFÈRE. — Les marbres de cet étage sont généralement gris ou roses. On peut citer le marbre Napoléon et le Haut-Banc dans le Boulonnais ; des marbres ardennais ;

4° TRIAS. — Marbres de Carrare et de Serravezza (marbres statuaires) ;

5° JURASSIQUE. — Marbres du Valais ;

6° CRÉTACÉ. — Marbres de Paros, du Pentélique et de Thasos, en Grèce. Marbres algériens ;

7° TERTIAIRE. — Ce sont plutôt des marbres grossiers ;

8° PLÉISTOCÈNE. — Ils se produisent sous la forme de travertins ayant l'aspect d'onyx, comme au Mexique ou dans le département d'Oran, où la valeur du mètre cube sur carrière atteignait souvent 1.000 francs avant guerre. Les gisements très restreints s'épuisent vite.

f) **Exploitation de Carrare** (Province de Lucques en *Italie*). — Les carrières de Carrare occupent 9.000 ouvriers, occupés tant à l'abatage qu'au transport, au demi-finissage et à l'expédition. On compte un grand nombre de sculpteurs. Le gisement est constitué par des bancs de calcaire marmoréen reposant sur des schistes paléozoïques talqueux et micacés et recouverts par des schistes triasiques. Le marbre blanc statuaire y est en masses ovoïdes, lenticulaires, irrégulières, au milieu de marbres plus impurs dont il est séparé par la « madre macchia », sorte de salbande formée de matières talqueuses et ferrugineuses. L'exploitation consiste à éventrer la montagne à coups de mine gigantesques (explosifs peu brisants) et à recueillir et débiter au bas les gros blocs qui roulent le long des pentes.

SULFATE DE CALCIUM

Le sulfate de calcium se trouve dans la nature sous deux formes : le sulfate anhydre ou *anhydrite* et le sulfate hydraté ou *gypse* ($SO^4Ca + 2H^2O$).

1. Usages. — Le *plâtre* est une poudre blanche, obtenue par la calcination incomplète du gypse : il contient, semble-t-il, du sulfate demi-hydraté et de l'anhydrite. Il doit être cuit au-dessous de 200°. Au delà de cette température, il est trop cuit et il reprend difficilement son eau de cristallisation. Un bon plâtre absorbe jusqu'à 100 % de son volume d'eau ; il doit faire prise assez lentement.

Pratiquement, on utilise le sulfate de calcium, sous forme de plâtre, pour le *moulage* et la *construction* (enduits). Il sert en particulier au moulage des fossiles ; mais, dans ce cas, il ne doit pas contenir de CO^3Ca et ne doit pas être attaquable à l'acide ; à cet effet, on emploie du plâtre spécial venant d'Angleterre. On en fait aussi des *stucs*, mélange de plâtre, de colle, de sulfate de zinc et de matières colorantes, susceptible de se polir. Le plâtre aluné donne aussi une variété de stuc. Il existe quelques autres débouchés, moins importants : fabrication des papiers peints et agriculture, où il semble avoir pour effet de faire passer les alcalis de la couche

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

superficielle dans la couche profonde du sol. Il sert surtout pour les légumineuses et les crucifères.

2. Statistique. — Le plâtre le plus estimé provient du bassin de Paris (carrières d'Argenteuil, Sannois, Romainville, Thorigny, etc.).

La production mondiale du gypse est de 8 à 9 millions de tonnes ; la *France* et les *Etats-Unis d'Amérique* en produisent plus des trois quarts.

La production des *Etats-Unis* qui s'élève à environ 5.000.000 de tonnes (5.150.000 tonnes en 1925 ; 4.630.000 tonnes en 1928), est entièrement consommée dans le pays même ; mais le plâtre indigène, provenant surtout des Etats de Michigan, d'Iowa et de New-York, ne peut servir qu'à des usages grossiers.

La *production française* a diminué pendant la guerre et remonté depuis :

1911	2.100.000 tonnes
1913	1.700.000 »
1918	850.000 »
1919	1.050.000 »
1920	1.500.000 »
1923	2.350.000 »
1925	2.331.200 »

La production des autres pays est la suivante :

Canada	1.000.000 tonnes	en 1928 et en 1929
Angleterre	660.000 »	en 1928 ; 520.000 en 1927
Australie	125.000 »	en 1927 (contre 54.000 en 1922)
Algérie	70.000 »	en 1925 (contre 25.000 en 1920)
Inde	60.000 »	en 1928 (38.000 en 1927)
Allemagne	45.000 »	en 1926 (Bavière seulement ; il faudrait ajouter la Prusse et le Duché de Bade).

3. Géologie des gisements. — L'*anhydrite* s'est formée comme le gypse par évaporation lagunaire des eaux de la mer. On croyait autrefois à une action prépondérante de la pression ; l'anhydrite se serait formée sous une profondeur d'eau de plus de 100 mètres ; le gypse sous une profondeur moindre. Il s'agit en réalité de facteurs tout différents. Les expériences de Van t'Hoff ont démontré le rôle considérable des sels associés et de la température dans la nature des dépôts d'évaporation d'une solution saline complexe. Ainsi, quand l'eau est chargée de chlorure de sodium, il se produit de l'anhydrite dès que la température est supérieure à 25°. Si l'eau était pure, il faudrait, pour que ces conditions se réalisent, une température supérieure à 90°.

L'anhydrite a pu postérieurement s'hydrater et donner lieu à des dépôts de gypse. Ce phénomène s'accompagne d'un gonflement considérable et rend très difficile le percement de tunnels à travers les bancs d'anhydrite : c'est le cas de plusieurs tunnels vosgiens. Réciproquement, le gypse peut se transformer en anhydrite vers 125°, mais le cas paraît avoir été réalisé très rarement.

L'origine du *gypse* et de l'*anhydrite* est donc, pour la majorité des cas,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

comme celle du chlorure de sodium, purement *lagunaire* (le gypse se dépose avant le sel).

On trouve cependant quelques concentrations de gypse et d'anhydrite dans les calcaires, par réaction de l'acide sulfurique, formé aux dépens des sulfures du terrain, sur le calcaire. Ce cas ne se réalise guère que dans le voisinage des filons métallifères ; dans les gisements zincifères, comme ceux du Laurion (dans des diaclases du calcaire.)

Le gypse est facilement remis en mouvement postérieurement au dépôt : c'est ainsi qu'on observe, dans les strates du Houiller de Decize (Nièvre), des intercalations de gypse, provenant des terrains triasiques gypsifères qui se trouvent au-dessus de lui.

4. **Terrains gypsifères.** — Le gypse se trouve comme le sel :

1° Dans le *Siluro-Dévonien*, sur le bord de la chaîne calédonienne ;

2° Dans le *Permo-Trias*, sur le bord de la chaîne hercynienne ;

3° Dans le *Tertiaire*, sur le bord de la chaîne alpine.

Le *Permo-Trias* donne de grandes assises gypseuses à *Decize* (Nièvre), dans la *Franche-Comté*, en *Lorraine*, dans les *Alpes* et les *Pyrénées*. En *Angleterre*, cette assise fournit un plâtre rigoureusement dépourvu de carbonate de calcium, ce qui présente un grand intérêt dans certaines fabrications.

Dans le *Tertiaire* du *Bassin de Paris*, les assises gypsifères atteignent leur maximum de développement (50 mètres). Elles sont divisées en quatre « masses » ; la plus importante, la plus constante et la plus épaisse (20 mètres) se trouvant à la partie supérieure ; elle forme la « masse des hauts piliers », constituée de gypse saccharoïde remarquable par sa division prismatique.

En *Italie*, les formations sulfo-gypseuses présentent un gypse saccharoïde, étudié à propos du soufre.

L'*albâtre gypseuse* ou *alabastrite* se rencontre en boules à *Volterra* (*Italie*) : facile à tailler au couteau, elle sert à l'ornementation. L'albâtre gypseuse de *Thorigny-les-Vallières* (*Seine-et-Marne*) sert à la fabrication d'un plâtre aluné, cuit à haute température.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XVIII

BARYUM, STRONTIUM, MAGNÉSIUM, ETC...

A. — BARYUM

1. Usages. — Le baryum a un certain nombre d'emplois. La *baryte* caustique est utilisée dans l'industrie. Le *bioxyde de baryum* sert à fabriquer l'eau oxygénée. Le *sulfate de baryum*, qui est le minerai courant, est blanc et très lourd, opaque, inaltérable ; il sert surtout dans la fabrication du lithopone ; on l'emploie aussi dans la fabrication des cartons glacés, du papier de tenture, des peintures à la détrempe (blanc-fixe obtenu en le mélangeant à CO^3Zn). Le *carbonate de baryum* est utilisé dans les manufactures de poteries et dans les verreries. Le *sulfure de baryum* sert dans l'industrie des matières colorantes.

2. Statistique. — La baryte étant souvent exploitée dans de petites carrières, il est difficile d'établir sa statistique. La production mondiale de barytes est d'environ 550.000 à 700.000 tonnes.

Les *Etats-Unis* en fournissent 200.000 à 250.000 tonnes.

L'*Allemagne* contribue à la production pour une quantité sensiblement égale (125.000 tonnes en 1924 ; 260.000 en 1928 ; 284.000 en 1929).

Puis viennent les productions de la *Grande-Bretagne* (50.000 tonnes), de la *France* (30 à 40.000 tonnes, auxquelles il faut ajouter la production algérienne : 500 à 1.200 tonnes), de l'*Italie* (30.000 tonnes).

L'*Espagne*, la *Belgique*, la *Russie* qui ont eu, il y a quelques années, une production de 15.000 à 20.000 tonnes, ont considérablement baissé : Espagne (6.000 à 8.000 tonnes), Russie (3.000 à 8.000 tonnes), Belgique (2.000 tonnes).

L'*Autriche*, l'*Australie*, l'*Inde anglaise* ont de petites productions comprises entre 1.000 et 3.000 tonnes.

3. Géologie des gisements de baryum. — Le sulfate de baryum (*barytine*) est le minerai courant ; le carbonate de baryum (*Withérite*) est plus rare.

I.) Barytine. — La *barytine*, considérée en chimie comme insoluble, est en réalité un peu soluble dans des solutions étendues de divers sels : on en connaît par suite des dépôts sur des fossiles et dans des sources ther-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

males (Lamalou, Hérault). Cette légère solubilité permet les remises en mouvement du sulfate de baryum.

Il se produit aux affleurements une concentration remarquable du baryum disséminé à l'origine dans des minéraux comme les feldspaths. Quand une roche contient à la fois du calcium et du baryum, les phénomènes d'altération ont pour effet d'éliminer la chaux et de séparer le baryum. La plupart des filons barytiques présentent donc une zone superficielle, riche, de concentration, au-dessous de laquelle la baryte disparaît. Des phénomènes connexes amènent souvent le manganèse à se concentrer en même temps que le baryum (Romanèche, en Saône-et-Loire).

On connaît en outre quelques filons où le baryum subsiste jusqu'à une grande profondeur (300-400 mètres) et où il peut avoir été apporté directement de la profondeur, comme les autres métaux.

Les *filons de barytine* montrent des associations diverses :

1° Filons avec association de fluorine et de quartz sans métaux sulfurés. — C'est le cas extrême des types suivants ; en particulier du type des filons de barytine et de plomb. Cependant ces filons sont assez distincts.

On les trouve en abondance dans le **Massif Central**, en **Bohême**, dans la **Meseta espagnole**. Ils forment généralement des veinules sans continuité, ayant l'aspect de craquelures du terrain. Certains de ces filons ont cependant un développement plus considérable ; tels sont ceux des environs de *Brioude* (Haute-Loire), où on exploite de la barytine et de la fluorine. On trouve, d'ailleurs, de la barytine dans la plupart des filons quartzeux du Massif Central, en particulier dans le grand dyke de quartz d'*Evaux* (Creuse) et dans les failles-limites de la Limagne. La barytine y est souvent d'origine récente, comme celle qui consolide les fissures par où viennent les eaux thermales, à *Bourbon-l'Archambault* (baryum et strontium), à *Evaux* (Creuse), à *Néris*.

2° Filons plombifères. — Le premier type passe progressivement à de véritables filons de barytine et de galène. Comme il a été dit, dans un très grand nombre d'entre eux, la barytine disparaît en profondeur et fait place au quartz (Ex. : *Sarrabus*, Sardaigne). Ailleurs le baryum subsiste à de grandes profondeurs, comme en **Saxe**, à *Freiberg* et *Annaberg* ; dans le **Harz**, à *Clausthal*, et en **Asie**, dans l'*Altaï* (la galène et la barytine y persistent jusqu'à 5 ou 600 mètres). Ces filons présentent des rubanements caractéristiques, avec d'innombrables alternances de pyrite, de galène et de blende ;

3° Filons cobaltifères. — Le cobalt étant aussi un métal qui se développe au voisinage de la surface, le baryum apparaît comme gangue dans ces filons et disparaît en même temps que le cobalt ;

4° Filons cuprifères. — Il en est de même des filons de baryum et de cuivre (cuivre gris, carbonate de cuivre avec sidérose) qui s'appauvrissent en barytine en profondeur. Un type peut être pris à *Huanchaca*, en **Bolivie**, grande mine de cuivre argentifère où le baryum a disparu en profondeur et a été remplacé par du quartz. De même en **Algérie** (Mouzaïa).

5° Filons antimonifères. — Les filons de barytine et d'antimoine se

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

trouvent dans un groupe déterminé de gisements d'antimoine, dans ceux qui sont en rapport avec les formations tertiaires, par exemple en **Hongrie**, à *Felsobanya*, où des tables de barytine enveloppent des aiguilles de stibine ;

6° Enfin on trouve parfois des noyaux de barytine dans des poches du calcaire (analogues aux concrétions phosphatées ou manganésifères).

En résumé, la barytine constitue *une des gangues* normales des filons métallifères ; mais elle n'existe pas avec le groupe de l'étain et métaux connexes, qui sont généralement associés avec le quartz. Elle est plus abondante dans les gîtes de minéraux qui sont arrivés sous la forme sulfurée.

Si la venue profonde du baryum peut paraître probable quand il persiste en profondeur, son origine superficielle (décomposition de certains feldspaths) est très nette dans un grand nombre de gisements.

II.) Withérite. — La withérite est beaucoup plus rare que son homologue, la strontianite (CO^3Sr), et cristallise comme elle en cristaux rhomboèdriques. On la trouve surtout dans les filons de barytine qui traversent des terrains calcaires ; ainsi on connaît au *Northumberland* (Angleterre) un filon de galène avec withérite, exploitée pour la céramique.

B. — STRONTIUM

1. Usages. — Ce métal a beaucoup d'analogies avec le baryum. Il sert surtout pour l'extraction du sucre des mélasses, pour laquelle on peut utiliser CO^3Ca, CO^3Ba, CO^3Sr. Le carbonate de calcium, moins cher, est généralement employé ; cependant le carbonate de strontium présente quelques avantages.

On utilise aussi le strontium pour la couleur rouge qu'il donne aux flammes (feux de Bengale, feux d'artifice). Il a également quelques applications en médecine.

2. Gisements. — Le strontium se trouve surtout à l'état de *strontianite* (CO^3Sr) et de *célestine* (SO^4Sr). En outre, il est disséminé dans certains minéraux : micas, pyroxènes, feldspaths ; il existe ainsi des feldspaths strontio-calciques, comme des feldspaths baryto-calciques. Mais il est en proportion plus faible que le baryum ; dans les roches d'une même région, la proportion entre le baryum, le calcium, le strontium reste à peu près constante.

Des roches, le strontium passe dans les eaux de la mer.

Comme le baryum et souvent en même temps, il se concentre dans les réactions superficielles. Mais, différemment du baryum, il joue un rôle insignifiant dans les filons concrétionnés et, soit à l'état de strontianite, soit surtout en célestine, il se développe en quantités relativement abondantes dans divers terrains sédimentaires.

I.) Strontianite. — Longtemps la strontianite n'a été l'objet d'aucune exploitation. Elle n'était connue que minéralogiquement : par exemple à *Strontian* en *Ecosse*, elle formait de petites veines dans des filons plombeux.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Puis vers 1875, on a découvert les gîtes importants de **Westphalie** (à *Ahlen*). Dans des terrains marneux appartenant au Sénonien, apparaissent de nombreuses fractures (1 centimètre à 50 centimètres de large) ayant une très grande longueur et l'aspect de fissures de retrait. Le remplissage est constitué par de la strontianite et de la calcite ; on a calculé que tous ces filons mis bout à bout auraient 44 kilomètres de longueur. Ils doivent s'épuiser en profondeur, car ils ont réduit leur production.

II.) Célestine. — *a*) Dépôts d'évaporation lagunaire. — Le strontium s'est isolé et a formé des dépôts d'évaporation lagunaire. A la dernière phase d'évaporation, il se dépose de la célestine ; aussi en trouve-t-on des traces accompagnant le gypse dans certains terrains marneux.

Bassin de Paris. — La célestine existe en inclusions et en rognons dans le gypse du Bassin de Paris et dans les marnes supra-gypseuses ; elle y a donné lieu à une petite exploitation.

On en trouve également des traces dans le Sénonien, dans les marnes blanches de Meudon provenant de la décalcification des calcaires daniens, dans l'argile plastique sparnacienne. Sa présence paraît être une particularité du Bassin de Paris ; cela tient sans doute à ce qu'elle n'a pas été recherchée ailleurs avec le même soin.

Sicile. — La célestine est associée avec des gisements de gypse et est disséminée dans les calcaires qui les accompagnent (2 à 3 % de Sr) ; le strontium a recristallisé dans les mêmes fissures que le soufre.

b) Filons. — Dans la *Drôme*, à *Condorcet*, un anticlinal intéressant les terrains jurassiques est jalonné par une fracture, le long de laquelle il y a de la blende, de la célestine et du baryum, avec du gypse (au mur) probablement produit par réaction chimique. La célestine se trouve aussi dans les marnes oxfordiennes, formant des boules géodiques avec du quartz et de la calcite.

A *Bourbon l'Archambault*, il existe également une association analogue de célestine, fluorine et galène, au griffon de la source thermale.

C. — MAGNÉSIUM

1. Usages. — Le *magnésium métallique*, en poudres, fils, rubans, produit une lumière intense, riche en radiations chimiques, utilisée en photographie, en pyrotechnie et dans la signalisation. On en fait un alliage avec l'aluminium (90 % Al environ), sous le nom de *magnalium* : cet alliage léger peut être forgé, moulé ; il est peu attaquable et résiste mieux à la torsion que l'aluminium.

Le *chlorure de magnésium* sert à préparer le magnésium métallique et à apprêter les étoffes de coton.

La *magnésie* (MgO), plus ou moins complètement calcinée, sert en thérapeutique. On en fait des ciments magnésiens (mélange de magnésie caustique et de chlorure de magnésium). Tous les sels de magnésie ont d'ailleurs des propriétés agglutinantes : le *silicate* se combine rapidement avec les mucilages pour produire des stucs très durs et susceptibles d'un beau poli ; le *fluosilicate* est employé pour le moulage des ornements ;

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

l'*oxychlorure* sert à agglomérer l'émeri pour en fabriquer des meules ; avec le silicate et des sables siliceux, il donne des pavés très durs.

La magnésie est aussi un corps pratiquement infusible, qu'on emploie dans la fabrication de produits réfractaires, supérieurs par leur cohésion aux produits réfractaires calciques, mais dont le prix élevé restreint les usages. On en fait des soles et des creusets, en l'agglomérant avec des matières gommeuses, avec des brais goudronneux ou avec des argiles grasses. Les briques silico-magnésiennes sont obtenues par l'action de la silice (20 %) sur le carbonate de magnésie ou par celle du silicate sur la magnésie calcinée.

La magnésie a encore des usages en verrerie, dans l'apprêt des toiles, calicots, papiers, dans l'industrie chimique (eaux minérales artificielles).

Le *carbonate de magnésium* est surtout appliqué à la fabrication de l'acide carbonique gazeux et de la magnésie, par calcination en vase clos ; à la fabrication du papier de bois.

La *dolomie* ($CO^3Ca + CO^3Mg$) trouve son emploi en métallurgie, dans la déphosphoration des aciers, comme absorbant de l'acide phosphorique. On en garnit des cornues Bessemer, des cubilots.

Le *sulfate de magnésium* est l'élément principal des eaux purgatives.

Parmi les *silicates magnésiens* : le *talc* [$(SiO^3)^4Mg^3H^2$] sert, en raison de son onctuosité, pour polir le verre et les métaux, graisser les machines ; on l'utilise dans la fabrication de la bouillie bordelaise qu'il fait adhérer aux feuilles ; il donne du poids et de la consistance aux papiers ; il est employé pour des peintures, les savons, les poudres de toilette, pour la falsification de substances blanches, pour enlever l'huile des étoffes de laine. Son prix est très variable suivant la qualité.

La *stéatite* (talc compact) sert à fabriquer les crayons de tailleur, des tubes réfractaires, des becs de gaz, des isolants électriques.

La *pierre à savon* est employée comme savon dans quelques pays d'Afrique (soapstone).

L'*écume de mer* [$(SiO^3)^3Mg^2H^2 + 2$ à $4H^2O$] est utilisée dans la fabrication des pipes, des brûleurs de becs de gaz, des tubes ;

La *serpentine* et la *néphrite* (trémolite compacte) ou *jade* servent comme pierres d'ornement.

2. Minerais. — Les minerais naturels d'où l'on extrait les divers produits magnésiens sont les *carbonates* (giobertite), les *dolomies*, les *chlorures de magnésium* (Stassfurt). En outre, les différents *silicates* énumérés sont recherchés pour leurs applications particulières. Les carbonates et les silicates sont généralement en relation avec l'altération de roches serpentineuses.

3. Statistique. — Les produits magnésiens sont extraits dans une foule de petites carrières ; aussi la statistique est-elle très difficile à établir.

La *giobertite* est exploitée en Autriche, en Russie (Oural), aux Etats-Unis (Californie), en Grèce (Eubée), au Canada, dans l'Inde, en Italie ; sa production annuelle s'élève de 500.000 à 1.000.000 de tonnes.

On produit également environ 200.000 tonnes de *dolomie* par an.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

A Stassfurt, on extrait annuellement 100.000 tonnes de *chlorure de magnésium.*

Le *talc* est produit par les Etats-Unis (200.000 tonnes en 1929), la France (75.000 tonnes en 1927), l'Italie (40.000 tonnes en 1929), l'Autriche (20.000 tonnes en 1929), le Canada (14.000 tonnes), l'Allemagne (7.000 tonnes), l'Espagne (5.000 tonnes).

4. Rôle géologique du magnésium. — Le magnésium est, plus même que le fer, l'*élément basique* par excellence. On le trouve dans les silicates magnésiens :

Serpentine (44 %) ;
Péridot (35 à 50 %) ;
Pyroxènes : enstatite (35 %), augite (15 %) ;
Amphiboles : Trémolite (25 %), actinote (22 %) ;
Micas : phlogopite (28 %), biotite (20 %) ;
Grenats, etc.

La haute teneur de la serpentine en magnésium explique l'abondance des produits magnésiens dans les régions serpentineuses.

La teneur moyenne de l'écorce terrestre en magnésie est de 4,4 % (chaux : 4.8 %).

Le magnésium des roches se dissout assez facilement et donne du sulfate, des bicarbonates, des chlorures. C'est sous cette forme qu'il arrive finalement dans les bassins d'évaporation et dans la mer.

Il peut alors se précipiter ; mais dans les dépôts, il se sépare du calcium pour rester avec les métaux alcalins. C'est l'un des produits qui se précipitent en dernier et il reste dans les parties déliquescentes.

5. Gisements de gioberlite. — On la trouve toujours en filons, en veines, *associée à des serpentines*, etc. Dans l'île d'**Eubée** existent des exploitations importantes, aujourd'hui en décroissance. On y a trouvé, au milieu des schistes talqueux, un certain nombre de filons qui, par suite de la résistance de la giobertite aux agents atmosphériques, dessinent des reliefs assez accentués.

En **Styrie**, elle est exploitée par une compagnie américaine.

On en connaît en **Italie**, dans la province de Turin, sur le flanc est du *Monte Capanna*, et dans l'*île d'Elbe*. On en a découvert dans l'**Inde** [production de 20 à 30.000 tonnes], dans l'**Afrique australe**, au **Vénézuéla.**

6. Gisements de dolomie. — L'origine des dolomies, qui a été discutée dans plusieurs cas particuliers, semble être multiple.

1° *Effets de réactions superficielles.* — Le carbonate de calcium s'enrichit en magnésium, par suite de la concentration de celui-ci, et passe à l'état de dolomie. En effet, la dolomie se dissout 50 fois moins vite que le calcaire ; par suite de la tendance à formation du produit le moins soluble, les calcaires se dolomitisent peu à peu.

Le même phénomène s'est produit le long de beaucoup de gisements de fer, de zinc et de plomb ; le calcaire est passé à l'état de dolomie ; il ne paraît pas y avoir eu d'apports de magnésium venant de la profondeur,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

car la dolomitisation y est nettement en rapport avec des phénomènes d'altération superficielle ;

2° La dolomie peut être exceptionnellement en *relation avec des roches éruptives*, le long de certains filons mélaphyriques. On avait invoqué à tort cette explication pour des récifs dolomitiques du Tyrol. Il s'agit en tout cas de phénomènes assez restreints ;

3° Il peut y avoir eu *précipitation dans des lagunes* en même temps que l'anhydrite ou pénétration de sels magnésiens dans des boues calcarifères pendant la sédimentation. Tel est le cas probable des dolomies qui se trouvent au-dessus des gîtes cuprifères du Mansfeld et de beaucoup d'autres dolomies sédimentaires, notamment celles qui abondent dans les formations littorales du trias vosgien.

En résumé, la dolomie est une substance très fréquente. On remarquera que, sa formation se faisant avec concentration, elle acquiert de ce fait une structure caverneuse.

7. Gisements de talc et de stéatite. — Le talc est généralement produit par une altération superficielle de schistes amphiboliques, de chloritoschistes, de roches à pyroxène, dont la magnésie se concentre dans les eaux. C'est une substance qui ne prend de valeur que lorsqu'elle est bien blanche et bien pure. Le talc forme des lentilles au milieu des schistes, associées parfois à des serpentines.

En *Styrie*, on exploite du talc sur les deux flancs d'un anticlinal, au contact d'un calcaire antécarbonifère et de chloritoschistes à graphite.

Dans l'*Ariège* (*Luzenac*), les talcs forment des lentilles au contact de schistes anciens et du granite. On a pu en extraire de gros blocs de stéatite de 2 mètres de côté. Il s'agit d'un talc très blanc, presque translucide.

Aux *Etats-Unis* (Etat de *New-York*), le talc forme des lentilles interstratifiées (de 0 m. 50 à 8 mètres d'épaisseur) au milieu de schistes à trémolite. Dans tous les cas, la formation du talc a dû être favorisée, au contact de schistes imperméables, par une circulation d'eaux superficielles qui s'étaient antérieurement chargées de magnésie dans les terrains voisins.

8. Gisements d'écume de mer ou magnésite. — C'est une substance rare qui vient uniquement d'*Eski-Cheir* (*Asie-Mineure*). Il y a là des brèches à blocs de serpentine, de calcaire et d'écume de mer. Les blocs utiles sont irrégulièrement disséminés dans une couche de 4 à 20 mètres d'épaisseur. Au toit et au mur, on observe d'autres brèches serpentineuses, mais sans écume de mer. On exploite d'une façon rudimentaire, par un grand nombre de petits puits, de 10 à 60 mètres de profondeur, qui vont atteindre la brèche, et par des galeries étroites étagées. On recueille les blocs de magnésite (généralement de la grosseur d'une pomme) ; on les gratte pour les débarrasser de leur gangue serpentineuse et terreuse ; on les polit avec des étoffes et on les expédie à Vienne (Autriche) où se trouve le centre du commerce de l'écume de mer

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

D. — GLUCINIUM

Nous avons déjà dit un mot de ce métal à propos de l'émeraude et signalé la grande importance que les métallurgistes modernes attacheraient à pouvoir se le procurer en abondance.

Sa position dans la classification chimique est discutable. Au point de vue métallogénique, il y a nettement un groupe Ca-Mg-Gl, parallèle au groupe Ca-Ba-Sr.

Il est probable que le glucinium est moins rare dans les terrains qu'on ne le croit. En effet, le glucinium se rencontre et s'isole dans les calcaires et l'on en trouve des traces dans beaucoup de roches.

On utilise les *silicates de glucinium* (*Emeraude, Phénacite*), des *aluminates de glucinium* (*Cymophane*).

E. — THORIUM, CÉRIUM, YTTRIUM, ETC...

1. Usages. — *L'oxyde de thorium* donne une vive lumière par incandescence : aussi l'emploie-t-on depuis 1894 dans la fabrication des manchons à gaz Auer. La luminescence du thorium, de l'yttrium, du cérium, etc., paraît en partie liée à leurs propriétés radio-actives.

Le *cérium* a trouvé application, sous forme de ferro-cérium, dans l'allumage (briquets).

2. Minerais. — Nous citerons surtout :

Des *silicates* (cérite, allanite, etc.) ;

Des *phosphates* (*monazite* : phosphate de cérium, lanthane et thorium) ; *xénotime* ; des *niobates, titanates, fluorures*, etc.

Le véritable minerai courant est constitué par les *sables à monazite* dont la production mondiale est actuellement en forte décroissance : *Brésil* (1.150 tonnes en 1920, rien en 1924, 317 tonnes en 1929) ; *Inde* (Travancore) (2.057 tonnes en 1919, 127 tonnes en 1922, 633 tonnes en 1924, rien en 1925, 183 tonnes en 1929) ; *Ceylan* (40 tonnes en 1919, 102 tonnes en 1922, 156 tonnes en 1927, 86 tonnes en 1929) ; *Etats-Unis* (34 tonnes en 1917, 1 tonne en 1925).

3. Gisements. — Tous ces métaux présentent des analogies de gisement avec le groupe de l'étain. Leur concentration s'est faite à la faveur des réactions alcalines et des fumerolles chloro-fluorées qui caractérisent les granulites, pegmatites et quartz connexes ou, dans un autre groupe, les syénites néphéliniques, phonolithes, etc. Leur zone de cristallisation se trouve dans l'auréole de ces deux groupes de roches, *surtout auprès des syénites néphéliniques* ; elle est donc liée surtout à des roches à feldspathoïdes.

Au *Brésil*, on a trouvé successivement une série de gisements alluvionnaires de sables à monazite, où celle-ci entre pour 2 %, le long de la mer et de certains cours d'eau traversant des roches syénitiques et des gneiss.

UNIVERSITÉ DE PARIS
SERVICE DE

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

La monazite y est associée avec une série de minerais lourds et avec les autres métaux rares.

En *Caroline*, les sables à monazite sont en relation avec des gneiss traversés par des pegmatites et des granites.

Dans les *Monts Ilmen*, des filons de syénite néphélinique renferment de la monazite.

A *Bangka* et à *Billiton*, on trouve aussi de la monazite dans les alluvions stannifères.

Il existe d'autres gisements de terres rares en *Scandinavie*, au *Groenland*, dans l'*Oural*, en *Australie*.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XIX

ALUMINIUM

Ce métal présente certaines analogies avec le glucinium, par lequel on voudrait aujourd'hui le remplacer. Il a, dès à présent, une grande importance industrielle qui se développera encore dans l'avenir. Plusieurs de ses composés sont utilisés.

1. Usages. — *a*) ALUMINIUM. — Il est extrêmement répandu dans l'écorce terrestre; mais son isolement pratique est récent, car les procédés classiques de réduction par le carbone ne s'appliquent pas à lui. C'est en 1827 que Wöhler isola pour la première fois quelques globules d'aluminium ; en 1854, Sainte-Claire-Deville en obtint des quantités notables en traitant par le sodium un chlorure double d'aluminium et de sodium ; en 1855, on tenta une exploitation industrielle à Javel et à Salindres ; l'aluminium valait 1.300 francs le kilogramme ; en 1880 on produisait 2.000 tonnes d'aluminium valant 150 francs le kilogramme ; en 1908 il valait à peine 1 fr. 50 le kilogramme. C'est là l'exemple peut-être unique d'un produit industriel dont le prix a baissé dans la proportion de 1.000 à 1. Au début de 1932, l'aluminium est coté 10,50 francs réduits le kilogramme (soit 2,10 franc-or).

Cette baisse rapide de prix a amené au point de vue commercial des à-coups importants quand la production était en avance sur la consommation. Encore actuellement, l'industrie de l'aluminium est dans un état instable.

L'aluminium a de nombreuses qualités spéciales : sa *légèreté* analogue à celle de la porcelaine; sa grande *malléabilité*, comparable à celle de l'or et de l'argent; sa *ductilité;* sa *ténacité*; son *inaltérabilité à l'air*, même à température élevée. Il a un grand défaut : sa *fusibilité à basse température*, vers 650 degrés ; il perd sa ténacité à une température beaucoup plus basse. Aussi ne peut-on pas l'employer pur pour la fabrication des machines. Malgré cela, soit pur, soit à l'état d'alliages, il a de nombreuses applications.

Sa légèreté lui donne une grande supériorité dans les industries de luxe (automobiles, cycles, aviation), dans la fabrication d'instruments d'optique, de physique, de chirurgie, de cuisine. Il remplace le zinc pour la lithographie. Son application à l'électricité peut lui donner un grand avenir. Pour le même prix on a, en volume, 4 fois plus d'aluminium que de cuivre ; le fil doit seulement être un peu plus épais, à cause de la conductibilité moins grande. On estime que, pour un usage électrique déterminé, on dépense 100 avec l'aluminium, alors que l'on dépenserait 205 avec le cuivre. Il y aurait cependant quelques inconvénients, de sorte que son utilisation est surtout une question d'avenir.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les *alliages* d'aluminium (*bronzes d'aluminium*) rendent, à cause de leur inaltérabilité, de grands services pour la fabrication des tuyaux, coussinets, monnaies, etc. ; on fabrique aussi des *laitons d'aluminium*, des alliages d'aluminium et de magnésium, d'aluminium et de tungstène.

L'aluminium sert également dans la métallurgie du fer ; introduit dans les coulées, il empêches les soufflures ; il donne à la fonte un grain plus fin.

L'*aluminothermie* est utilisée pour la réduction de certains oxydes métalliques ; la combustion de l'aluminium donne, en effet, une quantité de chaleur considérable et suffit à faire fondre certains métaux (chrome).

b) Composés de l'aluminium. — L'*alumine* est consommée en quantité croissante, comme produit intermédiaire entre la bauxite et l'aluminium métallique. L'*alumine cristallisée* constitue les *corindons*, les *rubis*, les *saphirs*, quand elle contient un peu de fer et de chrome ; l'*émeri* est utilisé comme abrasant.

Le *sulfate d'aluminium* se substitue à l'alun pour la teinture et la fabrication des papiers blancs. Les *aluns* ont toute une série d'usages pour la clarification des eaux, la thérapeutique (produits astringents), la teinture, la mégisserie, etc. Ils sont obtenus en partant, tantôt de la bauxite, tantôt des kaolins, tantôt de l'alunite, etc.

Le *sulfite d'aluminium* sert dans l'industrie du sucre.

2. Minerais. — Ce sont la bauxite, l'alunite, les aluns, le kaolin, la cryolite.

3. Statistique. — Elle est difficile à faire pour l'ensemble des produits alumineux et n'est possible que pour l'aluminium métallique.

Sa production totale s'accroît très vite dans l'ensemble ; elle s'est développée considérablement pendant la guerre, puis a fléchi dans les années qui ont suivi la guerre et, finalement, a repris sa marche ascendante jusqu'à la crise.

1897	3.200 tonnes	1924	170.000 tonnes
1907	32.000 »	1926	195.000 »
1914	85.000 »	1928	240.000 »
1918	165.000 »	1929	270.000 »
1920	125.000 »	1930	245.000 »
1922	100.000 »		

Cette production dépend surtout des conditions industrielles et du prix de revient de l'énergie électrique. Aussi est-elle surtout développée dans les pays de montagnes (Alpes, etc.), pays de la houille blanche.

Les *Etats-Unis* sont les plus gros producteurs ; depuis la naissance de l'industrie de l'aluminium, ils ont fourni la moitié ou plus du 1/3 de la production mondiale :

En 1897	1.800 tonnes	sur un total de	3.200 tonnes
En 1907	16.000 »	sur un total de	32.000 »
En 1914	40.000 »	sur un total de	85.000 »
En 1918	65.000 »	sur un total de	165.000 »
En 1926	70.000 »	sur un total de	195.000 »
En 1929	100.000 »	sur un total de	270.000 »
En 1930	105.000 »	sur un total de	245.000 »

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Puis viennent des pays de production moindre :

	1929	1930	Divers
	tonnes	tonnes	
Canada	36.000	23.000	(15.000 en 1918 ; 9.000 en 1922 ; 27.000 en 1927).
France	29.000	28.000	(12.000 en 1914 ; 12.000 en 1920 ; 23.000 en 1926).
Allemagne	31.500	25.000	(800 en 1914 ; 30.000 en 1926, 1927, 1928 ; 18.000 en 1924).
Norvège	29.000	23.000	(6.000 en 1920 ; 20.000 en 1924).
Suisse	20.000	18.000	(15.000 en 1916-1918 ; 12.000 en 1920).
Angleterre	10.000	16.000	(8.000 en 1914 ; 14.000 en 1918 ; 8.000 en 1924).
Italie	7.000	8.000	(900 en 1914 ; 1.700 en 1918 ; 800 en 1922 ; 3.500 en 1928).
Autriche	8.000	2.700	(4.000 en 1914 ; 8.000 en 1918 ; 4.000 en 1922 et en 1925).

4. Rôle géologique de l'aluminium. — L'aluminium joue un rôle essentiel dans la constitution de toute l'écorce terrestre, dont il forme 8, 10 % (15, 40 % d'alumine). Il est l'élément caractéristique des feldspaths et de leurs produits d'altération ; on le trouve dans les micas, grenats, amphiboles, pyroxènes et, en général, dans la plupart des silicates des roches : éléments blancs aussi bien qu'éléments ferro-magnésiens. Rarement l'alumine est isolée ou combinée avec un autre corps que la silice.

Dans les altérations superficielles, la séparation de l'alumine du silicium a pu se produire, donnant naissance aux bauxites et, en présence de pyrites, à de l'alun et à de l'alunite.

5. Bauxite. — *a*) Composition. — C'est de l'*alumine hydratée* [$Al^2O^3(H^2O)^2$] où le fer peut remplacer partiellement l'aluminium. Elle contient généralement :

Alumine	40 à 80 %
Oxyde de fer	0 à 20 %
Eau	10 à 15 %

Il y a de plus une certaine quantité de silice ; mais, à la différence de ce qui se passe dans les kaolins, cette silice n'est pas combinée, mais simplement associée. Cependant il paraît y avoir, dans certains cas, des mélanges de bauxite et de kaolin, formant une série continue entre les deux produits. Quant au fer, il a tendance à s'isoler en grains à structure pisolithique (bauxite mouchetée) ; il se trouve en quantités très variables et on passe insensiblement des bauxites à des minerais de fer alumineux.

La *valeur* de la bauxite varie avec sa teneur en alumine et ses impuretés. Tandis qu'en 1913, on payait 0 fr. 35 l'unité pour des bauxites à 50 % (soit 17 fr. 50 la tonne), l'unité pour des bauxites à 60 % montait à 0 fr.40

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

soit 24 francs) En 1931, la bauxite rouge pour la fabrication de l'aluminium (teneur 58 % Al^2O^3) était estimée 60 francs-réduits la tonne ; la bauxite grise pour abrasifs à 60-65 % Al^2O^3, 82 francs la tonne ; la bauxite blanche pour produits réfractaires à 60 % Al^2O^3, 110 à 200 francs la tonne selon sa pureté en Fe^2O^3.

b) EXTENSION. — Par suite de la valeur relativement faible de ces minerais, leur situation géographique et leur facilité d'exportation jouent un rôle important. Les principaux pays producteurs sont le *Sud de la France* (100.000 tonnes en 1921, 666.000 tonnes en 1929) et le *Centre des Etats-Unis* (140.000 tonnes en 1921 ; 400.000 tonnes en 1926 ; 366.000 tonnes en 1929 ; 330.000 en 1930). La zone d'extension des bauxites du *Sud de la France* s'étend tout le long de la côte méditerranéenne, depuis le Var jusqu'à l'Hérault (Villeveyrac) et à l'Ariège. Quelques gisements sont disséminés sur le bord sud du Massif Central, dans la Lozère et dans le Cantal. Aux *Etats-Unis*, les principaux centres sont dans la Géorgie, l'Alabama, le Tennessee, l'Arkansas.

On connaît également des gisements de bauxite en :

Guyane hollandaise	270.000 tonnes en 1930 ; 50.000 en 1926
Yougoslavie	155.000 en 1930 ; (100.000 tonnes en 1929)
Guyane anglaise	140.000 tonnes en 1930 ; (220.000 en 1929 et en 1926)
Italie	140.000 en 1930 ; (190.000 tonnes en 1929) ; (*Apennins, Karst*)
Hongrie	110.000 en 1930 ; 400.000 tonnes en 1929
Inde anglaise	9.000 tonnes en 1929 ; 15.000 en 1928 ; 5.000 en 1926 ; 23.000 en 1924. La bauxite paraît avoir un grand développement en rapport avec la décomposition latéritique des trapps (Est de Bombay).
Allemagne	7.000 tonnes en 1929 et en 1930 ; 2.500 en 1927 ; 15.000 en 1922 et 1926
Irlande	3 à 6.000 tonnes
Autriche	5.000 tonnes en 1926
Roumanie	1.000 tonnes en 1929 ; 7.000 en 1925

Au total, la production de bauxite s'élèvait en 1929 à plus de 2.100.000 tonnes ; elle a légèrement diminué en 1930 (1.770.000 tonnes).

c) ORIGINE. — La bauxite est un *produit d'altération continentale* comme les phosphates, les minerais de fer en grains, etc. Son mode de formation se réalise encore aujourd'hui par la décomposition des roches en pays tropicaux ; les alcalis et la silice se dissolvent ; celle-ci va se concentrer dans les chailles, les rognons, les meulières. Il y a alors production d'alumine libre. La bauxite peut donc être considérée comme le dernier terme d'une latéritisation sous un climat tropical, soit actuelle (Sénégal, Guinée, Madagascar), soit ancienne (Provence).

d) LA BAUXITE EN FRANCE. — La bauxite de *Provence*, connue depuis 1821, a donné lieu à de nombreuses discussions et théories. Son âge est bien déterminé, elle repose en transgression sur des terrains calcaires d'âge varié jusqu'à l'Aptien inférieur ; elle est, d'autre part, antérieure au Cénomanien qui la recouvre. Elle se place donc à la phase Albien-Cénoma-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

nien inférieur, pendant laquelle on observe dans ces régions une lacune dans la sédimentation, correspondant à une période d'exondation et, par conséquent, d'altération continentale. Elle forme une couche interstratifiée ayant jusqu'à 6 mètres d'épaisseur ou des poches dans le calcaire.

Aux *Baux* près d'*Arles*, elle est intercalée entre l'Aptien et le Turonien ; elle a une structure globulaire et est constituée par des grains pisiformes.

Il y a tous les passages entre les bauxites ferrugineuses et les fers en grains qui contiennent toujours une certaine proportion d'alumine libre. Tous ces minerais ont d'ailleurs une légère teneur en acide titanique ; comme les argiles. La teneur des bauxites en silice arrive à descendre à 3 % dans les bons échantillons. Les bauxites sont, soit rouges, soit blanches. Les variétés trop siliceuses (plus de 3 % et jusqu'à 30 %) sont utilisées pour la fabrication de briques réfractaires.

Aux environs de *Toulon*, les bauxites sont intercalées entre l'Aptien et le Turonien ; on trouve quelques lambeaux de Cénomanien par place ; aussi Marcel Bertrand a-t-il pensé que la lacune pouvait être là de nature tectonique.

Dans l'*Ariège*, la bauxite est recouverte par l'Aptien et semble donc être d'un âge antérieur aux minerais de Provence.

e) AUTRES GISEMENTS. — En *Italie* dans l'*Apennin Central*, il existe des gisements de bauxite, signalés par Sainte-Claire-Deville : d'ailleurs avec une méprise sur la position véritable du gisement.

Dans l'*Istrie*, d'innombrables filons de bauxite traversent le calcaire crétacé.

Les bauxites de l'*Inde* sont remarquables par leur teneur (12 %) en acide titanique.

Les bauxites des *Etats-Unis* sont très activement exploitées, surtout en Arkansas ; elles servent à produire de l'alumine, des aluns, un abrasant (l'alundum), des matériaux réfractaires. Elles sont là recouvertes par des argiles sableuses éocènes.

6. Alumine cristallisée. — Elle constitue : le rubis, le saphir, le corindon quand elle est pure ; l'émeri quand elle est impure. Elle résulte de l'isolement de l'alumine dans certains terrains et de sa cristallisation par métamorphisme.

a) **Rubis et saphir** : On a fait la *synthèse artificielle* du rubis et du saphir qui se fabriquent aujourd'hui d'une façon courante. Frémy et Verneuil les obtinrent les premiers en paillettes minces par l'action du fluorure de baryum, du carbonate de potassium et de l'alumine. On eut plus tard des rubis artificiels, en faisant fondre au chalumeau oxhydrique de l'alumine ou de petits rubis qu'on saupoudre de poussière de rubis, de façon à nourrir les cristaux primitifs. La coloration rouge est obtenue en ajoutant un peu d'oxyde de chrome. On avait essayé de même d'obtenir des saphirs en ajoutant de l'oxyde de cobalt ; mais celui-ci était rejeté par le bain ; on est arrivé à le fixer en ajoutant de la chaux ; on obtenait ainsi du saphir non cristallisé. Depuis on a eu de meilleurs résultats en faisant l'opération en milieu réducteur, avec addition d'un peu d'oxyde de fer ou de titane.

Conditions de gisements. — Les rubis et les saphirs se rencontrent, soit

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

dans les *granulites*, soit dans des *terrains métamorphiques*, soit dans des *alluvions*. A *Ceylan*, ils se trouvent dans diverses roches du groupe des granulites. Les corindons se recueillent dans les *Alpes* dans des dolomies et dans des cipolins où ils sont associés à des spinelles, à de la chondrodite. Mais, ainsi en place, ils sont généralement trop peu abondants pour pouvoir être exploités. On les recherche plutôt dans les points où ils ont subi une préparation mécanique naturelle, transportés dans des sortes de poches (*pieds d'éléphants*) comme à Ceylan où l'on trouve mélangés du rubis, du saphir, de la pierre de lune, de la chondrodite, des grenats.

On trouve des gisements analogues en *Birmanie* et dans le *Siam*, à la limite des possessions françaises.

b) **Emeri.** — C'est du corindon grenu contenant de l'oxyde de fer (jusqu'à 50 %) et un peu de silice.

Il a des applications importantes. Très dur, il raye à peu près tous les minéraux, sauf le diamant. On s'en sert donc pour le polissage. L'émeri de Smyrne (Turquie) est préférable à celui de Naxos (Grèce) et à celui du Canada. Les gisements de l'émeri sont comparables à ceux du saphir et du rubis, mais en masses plus considérables.

Le gîte de **Naxos**, connu de toute antiquité, a une production qui varie entre 7.000 et 10.000 tonnes. Il comprend des masses lenticulaires (5 à 50 mètres) d'émeri et d'argile au milieu de cipolins et de dolomies saccharoïdes, reposant sur des micaschistes. Le cube total est évalué à 5 millions de tonnes. L'extraction est difficile à cause de la dureté de l'émeri qui résiste aux outils d'acier. L'émeri a une teinte brunâtre qui le fait ressembler aux oxydes de fer.

Aux environs de **Smyrne**, où existent beaucoup de gisements très dispersés (production environ 20.000 tonnes), l'émeri est associé avec des débris de calcaires cristallins, formant une sorte de brèche détritique qui remplit des fissures superficielles ou de véritables grottes dans le calcaire. Il est permis de se demander si ce ne seraient pas d'anciennes bauxites qui auraient donné l'émeri par métamorphisme, comme les calcaires donnent des cipolins et les argiles, des schistes.

Aux *Etats-Unis*, certains gisements intercalés dans des schistes talqueux sont associés à des minerais de fer ; leurs produits furent même exploités pour fer ; ce n'est qu'au haut fourneau que l'on s'aperçut de leur infusibilité.

Il existe aussi des gisements dans l'*Inde* et au *Canada* (Production : 1.500 tonnes de corindon en grains, dans l'Ontario).

7. Alun. — $(SO^4)^3Al^2 + SO^4K^2$. Il se produit en efflorescences, quand de l'acide sulfurique, provenant de pyrites altérées, se trouve en présence de sels potassiques résultant de la décomposition des feldspaths. C'est ainsi que se sont formés des cristaux d'alun, notamment au pied du *Mont Dore*, et en *Asie Mineure*.

On le produit aussi artificiellement, en faisant décomposer des *schistes alumineux* pyriteux, soit seuls, soit en y ajoutant de la potasse à l'état de sel de Stassfurt ou de kaïnite.

8. Alunite. — C'est une substance beaucoup plus rare que l'alun. C'est

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

un sous-sulfate d'aluminium et de potassium qui contient 57 % d'alun, rendu insoluble par un excès d'alumine. Pour la transformer en alun, on traite successivement par de l'acide sulfurique et du sulfate de potassium, après pulvérisation et calcination.

La production est à peu près monopolisée par les gisements de la **Tolfa,** près Civita-Vecchia, découverts au xv^e^ siècle par un gentilhomme vénitien revenant d'Asie Mineure. Il y a là d'immenses excavations à ciel ouvert ; successivement chacune d'elles s'est épuisée en profondeur et on a été réduit à un seul filon, *Providenza,* qui s'est à son tour coincé en profondeur. On fait des glanages sur les anciens résidus d'exploitation.

La région est formée par un massif de trachyte reposant sur des terrains éocènes ; tout le flanc sud du massif est coupé de filons de pyrite plus ou moins altérés, parfois accompagnée d'autres sulfures. Dans l'intérieur même, on ne trouve plus de filons pyriteux, mais d'innombrables veines d'alunite formant un réseau de fissures en éventail. Ce sont ces veines que l'on a exploitées. Le filon Providenza atteint par endroit 10 mètres de large et cesse d'être utilisable quand il descend au-dessous de 0 m. 80.

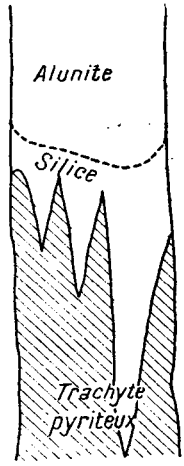


Fig. 78. — Coupe verticale de l'un des filons de la Tolfa.

On a considéré autrefois l'alunite comme le produit d'une sorte de venue éruptive ; en réalité, il s'agit d'un phénomène, assimilable aux phénomènes de kaolinisation et lié au voisinage de la surface, car il cesse progressivement en profondeur, où l'alunite est remplacée par des trachytes pyriteux (fig. 78).

La coupe longitudinale d'un filon montre que la surface suivant laquelle se produit cette transformation n'est pas régulière et qu'elle coïncide grossièrement avec le niveau hydrostatique de la région. L'alunite pro-

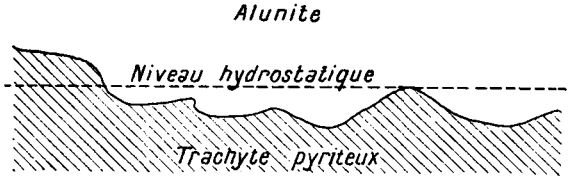


Fig. 79. — Coupe longitudinale des filons de la Tolfa.

viendrait donc d'une altération superficielle des feldspaths du trachyte en présence de la pyrite : là où le trachyte n'est pas pyriteux, l'altération n'a produit que du kaolin.

L'alunite est mélangée d'une certaine proportion de cristaux de quartz, proportion qui augmente en profondeur où le filon devient presque exclusivement quartzeux avant de passer au trachyte. Les silicates d'alumine se seraient décomposés et la silice éliminée s'est concentrée à la base du

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

filon ; le phénomène est en quelque façon comparable à la cémentation. De même la barytine, présente dans les parties superficielles, disparaît en profondeur.

L'alunite est rouge si le trachyte encaissant est rouge ; blanche si la roche encaissante est blanche. La coloration rouge est liée à la peroxydation de la pyrite.

Cependant les filons d'alunite paraissent en relation avec des filons métalliques ou avec leur prolongement. C'est sur certaines veines des trachytes, plus riches en sulfures métalliques, qu'ont porté les transformations ultérieures qui ont donné naissance à l'alunite.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XX

CHROME

1. Usages. — Le chrome a deux emplois principaux : l'*industrie des matières colorantes* et la *métallurgie.*

a) Le premier de ces usages est déjà ancien ; il ne s'est guère développé. Les composés du chrome (oxyde, chromates) donnent des couleurs vertes et jaunes pour les papiers peints, la céramique. Cet emploi nécessite des minerais à fortes teneurs (50 % de Cr^2O^3). Les principales usines se trouvent à Elberfeld en Allemagne, à Glascow en Ecosse, à Baltimore aux Etats-Unis.

b) L'emploi du chrome en métallurgie, encore récent, prend une extension de plus en plus grande. Il a fait passer la consommation à 250.000 tonnes (minerai). Le chrome sert à la fabrication des ferrochromes. Il est utilisé en alliage avec l'acier et il est un des premiers métaux qu'on lui ait ajoutés. Il augmente la dureté de l'acier (à très forte dose, il le rend cassant) et le rend propre aux blindages, obus, outils ; mais l'alliage semble être instable et détermine des ruptures subites ; on y obvie en prenant des aciers demi-doux au lieu d'acier doux.

Le chrome sert à fabriquer des soles neutres pratiquement infusibles, pour acier soudable et fer fondu soudant, des fours, des creusets. On l'emploie tantôt en agglomérés, tantôt à l'état de briques formées de fragments de chromite naturel.

c) Le chrome a en outre quelques usages secondaires : en photographie, dans certaines piles (bichromate). L'acide chromique sert comme source d'oxygène.

En 1932, on vend le ferro-chrome carburé sur la base de 60 % de chrome, de 560 à 760 francs-or.

2. Minerais. — Les minerais sont de deux sortes : 1° Le *fer chromé* ou *chromite* qui, pratiquement, est seul exploité (Cr^2O^3, FeO) ; 2° la *crocoïse* ou chromate de plomb, qui n'a qu'un intérêt théorique.

3. Statistique. — Les gisements de fer chromé se composent uniquement d'amas limités, précaires, formés par ségrégation en milieu basique. Il en résulte le caractère instable et le déplacement des exploitations individuelles, les champs d'exploitation pouvant néanmoins persister dans certaines régions favorisées par le développement des péridotites chromifères.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

La production mondiale de fer chromé, qui était de 60.000 tonnes vers 1900, s'est rapidement élevée à 130.000 tonnes en 1906, à 160.000 tonnes en 1912, à 280.000 tonnes en 1918, à 310.000 tonnes en 1925, à 410.000 tonnes en 1927, à 450.000 tonnes en 1928. Elle était en 1929 voisine de 600.000 tonnes.

Plus de la moitié de cette production vient aujourd'hui de l'Afrique Australe, où le plus gros producteur est la *Rhodésia du Sud* dont l'exploitation a commencé en 1926 (200.000 tonnes en 1928, 266.000 tonnes en 1929). L'*Union sud-africaine*, exploitée depuis quelques années, a produit 64.000 tonnes en 1929 (31.000 tonnes en 1928 ; 12.000 tonnes en 1926 ; 80 tonnes en 1922).

Puis vient la *Nouvelle-Calédonie*, qui a une production assez irrégulière (80.000 tonnes en 1911 ; 40.000 en 1914 ; 75.000 en 1916 ; 25.000 en 1918 ; 90.000 en 1920 ; 10.000 en 1922 ; 60.000 tonnes en 1929).

Cuba a produit 54.000 tonnes en 1929 (9.000 en 1918, 17.000 en 1927, 34.000 en 1928).

L'*Inde anglaise*, qui ne produisait que 3.000 tonnes en 1912, a fourni 50.000 tonnes en 1929 (58.000 en 1918 et en 1927).

La *Yougoslavie* a une production en croissance très rapide : 43.000 tonnes en 1929, 12.000 tonnes en 1925.

La *Russie* (*Oural*), qui donnait plus de 20.000 tonnes en 1912, fut en forte décroissance après la guerre (270 tonnes en 1922) ; actuellement elle a repris sa place parmi les producteurs de fer chromé (30.000 tonnes en 1925 et en 1926 ; 25.000 tonnes en 1928).

La *Grèce* est en progression (21.000 tonnes en 1928).

La *Turquie* (*Asie Mineure*) a une production très variable (20.000 tonnes en 1912 ; 2.500 en 1922 ; 7.000 en 1925 ; 18.000 en 1927 ; 15.000 en 1929).

Le *Japon* arrive à un total de 10.000 tonnes en 1929 (en progression régulière depuis 1920).

Enfin il y a des productions moins importantes :

Chypre (2500 tonnes en 1929) ; *Grande-Bretagne* (380 tonnes en 1927) ; *Australie* (130 tonnes en 1929 ; 1.000 tonnes en 1925). *Indochine* (1500 tonnes en 1930).

Les *Etats-Unis*, qui ont extrait pendant la guerre jusqu'à 83.000 tonnes (en 1918), ne donnent presque plus rien (270 tonnes en 1929 ; 670 tonnes en 1928 ; 100 en 1925). — De même le *Canada* (20.000 tonnes en 1918 ; rien en 1927). — Les gîtes de la Styrie et du Banat sont épuisés.

4. Gisements.

I. Fer chromé (*Chromite*). — Il se trouve en *inclusions* et en *ségrégations* dans des péridotites, généralement serpentinisées. On connaît des roches où le fer chromé est disséminé comme l'est la magnétite et n'a pas grande valeur [le chrome peut s'y trouver aussi sous la forme de spinelle (picotite)]. Puis il se concentre en grains noirs assez volumineux. Enfin il peut former par ségrégation des noyaux, amas, lentilles, pseudo-filons. L'exploitation s'arrête en général à 40 ou 50 mètres de la surface, non pas parce que le minerai est lié à celle-ci, mais parce qu'il s'agit d'énormes nodules limités et disséminés.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les amas de fer chromé se rencontrent dans des régions à serpentine ; mais pas dans toutes. Ils donnent lieu, par suite de leur forme, à des exploitations précaires qui se déplacent. Ils sont pour la plupart très analogues.

Les gisements de **Nouvelle-Calédonie** se trouvent en roches ou en éboulis. Ceux-ci sont les plus faciles à exploiter et fournissent la plus forte proportion de minerai. Au-dessus de la péridotite, à surface irrégulière, on trouve une argile rouge de décomposition avec beaucoup d'oxyde de fer accompagné de minerais de nickel, de cobalt, de chrome : à la base, on rencontre un lit de fragments irréguliers de péridotite, plus ou moins altérés et, au-dessus, le fer chromé s'est concentré en grains et en longues traînées.

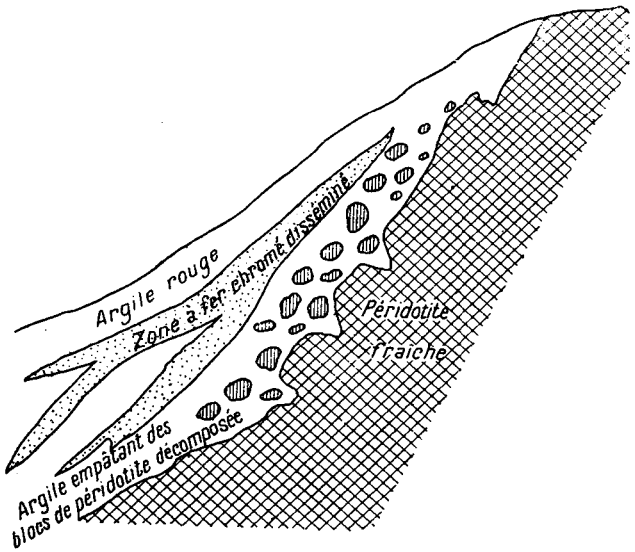


Fig. 80. — Schéma de la disposition des gîtes de fer chromé dans la péridotite en Nouvelle-Calédonie.

Au **Canada**, à l'Est de Québec, dans la région chromifère de la « Serpentine belt », les péridotites et serpentines forment des massifs intrusifs au milieu de schistes probablement cambriens. Des ségrégations de fer chromé se sont produites dans la péridotite : de préférence, semble-t-il, vers le contact de la péridotite et des schistes encaissants. On trouve quelquefois de la serpentine fibreuse (chrysotile) au voisinage des amas.

Les gisements de la **Rhodésia** et de l'**Inde anglaise** sont analogues.

En **Asie Mineure**, on connaît de nombreux gisements de fer chromé dans des serpentines tertiaires. Aux environs de Brousse, à *Tchardy*, se développent des masses serpentineuses de 15 à 20 kilomètres de large, au milieu de schistes recouverts par des calcaires tertiaires Le fer chromé forme des lentilles très irrégulières, au milieu de la serpentine, dont les dimensions peuvent atteindre 30 mètres × 2 à 3 mètres. De même, à *Mételin*, où les amas de chromite s'accompagnent d'opale et de chry-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

sotile. A *Rhodes*, les serpentines chromifères sont associées au flysch éocène qui recouvre en concordance les calcaires crétacés.

Des gisements identiques existent en **Grèce** (*Thessalie*, *Eubée*) et dans le **Banat**.

Dans l'**Oural**, le fer chromé est en amas et en pseudo-filons dans la serpentine, avec association de magnétite.

Dans l'ensemble, la chromite s'associe au nickel, au cobalt, au manganèse, mais non aux métaux sulfurés.

II. Crocoïse. — C'est une substance assez rare. On la trouve dans des *filons acides, en relation avec des granulites*. Elle serait due à l'action des fumerolles chloro-chromiques sur des sels de plomb. Elle s'est isolée en même temps que les sels de bismuth, la tourmaline, la pyrite, la pyrite arsenicale, l'or natif, la chalcopyrite. Elle appartient donc au groupe stanno-cuprifère. Elle se rencontre avec un peu de galène.

Les principaux gisements sont ceux de *Bérézowsk* (*Oural*), du *Transvaal*, du *Swaziland*. Le gîte minéralogique de Bérézowsk sera décrit au chapitre de l'Or.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXI

FER

A. — INDUSTRIE ET STATISTIQUE

1. Usages. — Contrairement à ce que l'on pourrait croire, les usages du fer n'ont pris d'importance que depuis une époque récente. Sans doute le fer a été employé de tout temps, mais il n'a eu pendant longtemps d'application qu'en ce qui concerne les petits objets. La tradition antique en faisait un métal de grande valeur ; Homère rapporte que, dans une course, on donnait un lingot de fer comme prix. Les métallurgies primitives, en effet, obtenaient facilement le cuivre et les alliages de cuivre, alors qu'elles ne produisaient qu'un fer de mauvaise qualité et en quantités minimes. On n'obtint du fer en quantités notables que lorsqu'on sut établir des souffleries sur les fourneaux. L'usage du fer se développa progressivement, pour la fabrication des outils et des armes ; cependant, au Moyen-Age, celles-ci étaient encore fabriquées en bronze.

Ce n'est guère qu'au XIX^e^ siècle, avec le développement des exploitations houillères, des voies ferrées, de la navigation à vapeur, avec l'extension de l'emploi des machines et la construction de grands ouvrages d'art, que le fer commença à être utilisé en quantités réellement considérables.

2. Minerais industriels. — On peut distinguer trois étapes dans leur utilisation.

a) A l'origine, on cherchait à traiter les minerais très fusibles et très purs. On a donc exploité tout d'abord des *magnétites* et des *limonites* ; les sables à magnétite ont été recherchés comme les sables stannifères, le long des cours d'eau et des côtes. Les gisements remaniés et superficiels de la Nièvre, de la Vendée, de la Bourgogne, de la Haute-Marne et des Pyrénées ont été, pour les mêmes raisons, mis en valeur dès le début. Les scories anciennes, disséminées un peu partout et qui ont été parfois réexploitées, montrent le nombre énorme de ces petites exploitations.

b) Au XIX^e^ siècle, l'exploitation s'étendit à des minerais moins fusibles. Vers 1860, l'invention du Bessemer vint bouleverser toute la métallurgie du fer et fit rechercher les minerais très riches et très purs, un peu manganésifères et *aussi exempts que possible de phosphore* (*hématite* encaissée dans des terrains calcaires). La région de Bilbao, les Pyrénées, le Cum-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

berland, l'île d'Elbe, l'Erzberg styrien, la Suède (Dannemora) fournirent une quantité considérable de minerais répondant aux conditions requises. Ils valent relativement cher et sont en voie d'épuisement.

c) L'invention des procédés de déphosphoration par le convertisseur basique (vers 1878) et le four Martin permit d'exploiter les minerais que leur *teneur élevée en phosphore* avait jusqu'alors fait rejeter. A l'heure actuelle, ces derniers constituent la *source principale de matière première.* Parmi les régions qui ont pris de ce fait ou sont à la veille de prendre une importance primordiale, on peut citer : la *Laponie suédoise* (Kirunavara Gellivara), la *Lorraine française,* la *Normandie,* les *Etats-Unis* (Clinton), le *Cleveland* en Angleterre, etc.

d) Enfin, certains grands amas de *titano-magnétites,* dès à présent bien connus en Norvège et en Afrique, fourniront de grosses réserves quand on saura les traiter. Il en sera de même de certains minerais de fer arsenicaux.

Nous constatons donc que l'industrie du fer s'est déplacée tant au point de vue des gisements qu'à celui de la nature des minerais utilisés.

3. Conditions d'exploitation industrielle. — Elles peuvent se ramener aux suivantes :

1° Les minerais doivent se prêter à une *exploitation économique* : l'extraction en carrières, quand elle est possible, présente sous ce rapport une grande supériorité. Les excavations du Lac Supérieur constituent un type d'exploitation à faible prix de revient.

2° Le gisement doit être *très étendu,* car les frais de première installation sont toujours considérables dans une exploitation active. Les grands gîtes sédimentaires réalisent cette condition.

3° *La teneur en fer ne doit pas être inférieure à* 30 %.

4° La *nature des impuretés* contenues dans le minerai intervient aussi : les minerais renfermant du *calcaire* sont plus fusibles que les minerais siliceux. La présence de *manganèse* est également une circonstance favorable. Par contre, l'existence d'*arsenic,* de *titane* peut provoquer, si ces éléments sont en proportion notable, l'impossibilité de traiter pratiquement le minerai. En ce qui concerne le *phosphore,* la question est aujourd'hui résolue, ainsi que nous l'avons indiqué.

Suivant la teneur en phosphore, on peut répartir les minerais en 3 classes :

Classe	Teneur en phosphore	Traitement
I	de 0 à 0,05 %	Bessemer acide;
II	de 0,05 à 0,08 %	Mélange avec d'autres minerais
III	de 0,08 à 0,1 %	Déphosphoration (convertisseur basique, procédé Martin)

5° Le gîte doit être *facilement accessible* et dans une situation *géogra-*

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

phique favorable. Autant que possible, il doit se trouver à proximité, soit de la mer, soit d'un centre de production de la houille, de sorte que le traitement du minerai puisse se faire sur place. L'épuisement des gîtes les plus favorablement placés tend d'ailleurs à diminuer l'importance de cette condition. C'est ainsi que les gisements d'Algérie et de Laponie suédoise ont pu être mis en valeur malgré leur distance de la côte.

Les régions où l'association du fer et de la houille est réalisée donnent lieu, dans les pays civilisés, à la constitution de centres métallurgiques dont l'importance industrielle peut devenir énorme : Allemagne, Angleterre, France, Etats-Unis. On assiste aujourd'hui à un phénomène de ce genre dans des pays nouvellement ouverts à l'industrie : par exemple en Chine (Han Kéou), en Sibérie (Kousnetzk).

Les pays privés de combustible minéral ne peuvent qu'exporter leur minerai.

Parmi les consommateurs les plus importants, l'Allemagne offre des débouchés énormes aux producteurs de minerai. Aussi s'est-elle efforcée de devenir propriétaire de mines en Laponie suédoise, en Lorraine, à Bilbao, au Maroc. Les Etats-Unis, quoique leur production soit encore considérable, doivent également envisager comme une éventualité relativement prochaine l'épuisement des minerais riches du Lac Supérieur et la nécessité de faire appel à des gisements actuellement inexploités ou à l'annexion de régions ferrifères étrangères, comme cela s'est déjà produit pour Cuba.

4. Commerce. — La plupart des usines à fer, même dans les pays producteurs de minerais, sont amenées à acheter au dehors au moins une partie de leurs minerais pour faire les mélanges destinés à leurs lits de fusion.

Les achats de minerais de fer se font généralement, pour chaque qualité déterminée, à un prix de... par unité de fer avec une échelle pour les faibles variations de teneur en plus ou en moins : échelle ne s'appliquant plus au delà de certaines limites.

Le minerai à moins de 32 % est difficilement vendable. Les mines de Lorraine exportent des minerais tenant de 32 à 40 % de fer. De 30 à 32 % le traitement se fait le plus souvent sur la mine. Au-dessous de 30 %, le minerai n'est plus qu'une castine ferrugineuse et sa valeur est très réduite. Ainsi les minerais luxembourgeois à 25 %, ont une valeur minime et ne peuvent être vendus que parce qu'ils sont calcaires. Beaucoup de ces minerais à faible teneur, comptés actuellement pour zéro dans les estimations de cubage, pourraient être mis en exploitation avec une légère augmentation du prix de vente ou un léger abaissement du prix de revient.

5. Statistique. — Les statistiques de minerais ne sont pas comparables entre elles, les teneurs et les qualités de ces minerais étant extrêmement diverses. Nous ne donnerons donc ici que les chiffres concernant la fonte et l'acier, tout en reconnaissant d'ailleurs que ceux-ci ne correspondent nullement aux extractions de minerais, puisqu'il y a vente et exportation de minerais d'un pays à l'autre.

La statistique de la **fonte** montre d'une façon nette une augmentation

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

formidable de la production. Régulièrement croissante jusqu'en 1914, cette production a subi un recul accentué du fait de la guerre et au cours des années qui ont suivi. De 1921 à 1929 elle était à nouveau croissante ; mais elle a fléchi depuis 1930.

1800...	0,8	millions	de tonnes.	1918.....	64	millions	de tonnes.
1850...	5	»	»	1919.....	52	»	»
1871...	13	»	»	1921.....	37	»	»
1891...	26	»	»	1922.....	55	»	»
1900...	40	»	»	1927.....	86	»	»
1910...	66	»	»	1929.....	98	»	»
1913...	80	»	»	1930.....	80	»	»

Cette production se répartit ainsi en millions de tonnes (chiffres de 1929), entre les différents pays, dans l'ordre d'importance :

Etats-Unis	43,2 (1900 : 14 ; 1913 : 31 ; 1918 : 40 ; 1921 : 17 ; 1928 : 39 ; 1930 : 32).
Allemagne	13,6 (1913 : 19 ; 1919 : 6 ; 1923 : 5 ; 1928 : 12 ; 1930 : 10).
France	10,6 (1913 : 5 ; 1918 : 1,3 ; 1928 et 1930 : 10,2).
Grande-Bretagne [1] ..	7,7 (1913 : 10 ; 1919 : 7,5 ; 1921 : 2 6 ; 1923 : 7,6 ; 1926 : 2,5 ; 1928 : 6,7 ; 1930 : 6,3).
Russie	4 (1913 : 4,6 ; 1919 : 0,1 ; 1928 : 3,3 ; 1930 : 5).
Belgique	4 (1913 : 2,4 ; 1919 : 0,25 ; 1928 : 3,9 ; 1930 : 3,5).
Luxembourg	2,9 (1919 : 0,6 ; 1928 : 2,8 ; 1930 : 2,5).
Sarre	2,1 (1930 : 1,9).
Japon	1,8 (1913 : 0,25 ; 1919 : 0,8 ; 1928 : 1,5 ; 1930 : 1,6).
Tchécoslovaquie	1,7 (1928 et 1930 : 1,6).
Inde	1,4 (1913 : 0,2 ; 1919 : 0,3 ; 1925 : 0,9 ; 1928 : 1,1 ; 1930 : 0,9).
Canada.....	1,1 (1913 et 1920 : 1 ; 1925 : 0,6 ; 1928 : 1 ; 1930 : 0,8).

Puis viennent des productions moins importantes :

Espagne	0,7.
Pologne.....	0,7 ; (0,5 en 1930).
Italie	0,7 ; (0,5 en 1930).
Suède	0,5.
Autriche	0,45 ; (0,4 en 1930).
Hongrie	0,3.
Australie	0,3.
Chine	0,25.
Pays-Bas	0,25.

De même, la statistique de l'**acier** montre une forte augmentation de la

(1) Les irrégularités de la production anglaise s'expliquent par des crises intérieures.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

production, avec recul momentané pendant les années de guerre et remontée pendant celles qui ont suivi, mais fléchissement en 1930 :

1913	80 millions de tonnes		1922	67 millions de tonnes	
1918	74 »	»	1925	90 »	»
1919	59 »	»	1929	120 »	»
1920	72 »	»	1930	95 »	»
1921	45 »	»			

Cette production se répartit ainsi, en 1929, entre les différents pays, et par ordre d'importance en millions de tonnes :

Etats-Unis	57 (1913 : 32 ; 1918 : 45 ; 1921 : 20 ; 1928 : 52 ; 1930 : 41).
Allemagne	16,5 (1913 : 19 ; 1919 : 7 ; 1922 : 12 ; 1923 : 6 ; 1928 : 14,7 ; 1930 : 11,7).
France	9,8 (1913 : 4,6 ; 1919 : 2,2 ; 1928 et 1930 : 9,5).
Grande-Bretagne	9,8 (1913 : 7,8 ; 1918 : 9,7 ; 1921 : 3,7 ; 1923 : 8,6 ; 1926 : 3,5 ; 1928 : 8,6 ; 1930 : 7,4).
Russie	4,8 (1913 : 4,2 ; 1920 : 0,1 ; 1928 : 4,3 ; 1930 : 5,6).
Belgique	4,1 (1913 : 2,4 ; 1918 : 0 ; 1928 : 3,9 ; 1930 : 3,4).
Luxembourg	2,7 (1913 : 1,3 ; 1919 : 0,3 ; 1928 : 2,5 ; 1930 : 2,3).
Sarre	2,2 (1913 : 2 ; 1920 : 0,6 ; 1928 et 1930 2).
Tchécoslovaquie	2,2 (1919 : 0,8 ; 1928 et 1930 : 2).
Italie	2,1 (1913 : 0,9 ; 1921 : 0,7 ; 1928 : 1,9 ; 1930 : 1,8).
Japon	2,1 (1913 : 0,3 ; 1922 : 0,9 ; 1928 : 1,5 ; 1930 : 1,8).
Pologne.....	1,4 (1919 : 0,01 ; 1928 : 1,5 ; 1930 : 1,25).
Canada	1,4 (1913 : 1 ; 1919 : 0,9 ; 1928 : 1,3 ; 1930 : 1).
Espagne	0,95 (1913 : 0,2 ; 1928 : 0,75 ; 1930 : 0,9).
Suède	0,7 (1913 : 0,6 ; 1921 : 0,2 ; 1928 et 1930 : 0,6).
Autriche	0,6 (1913 : 2,6 ; 1918 : 0 ; 1928 : 0,65 ; 1930 : 0,5).
Inde	0,6 (1919 : 0,2 ; 1928 : 0,45 ; 1930 : 0,6).
Hongrie	0,5 (1913 : 0,8 ; 1918 : 0 ; 1928 : 0,5 ; 1930 : 0,45).
Australie	0,35 (1913 : 0 ; 1928 : 0,45 ; 1930 : 0,42).

Si on met à part les Etats-Unis, on voit que la presque totalité de l'industrie du fer de trouve concentrée en Europe.

6. Principaux centres de production. — ETATS-UNIS. — Le Bassin du *Lac Supérieur* a produit, en 1909, 43 millions de tonnes de minerai, soit près de 80 % de la production totale (54 millions de tonnes) des Etats-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Unis. En 1929, la production du Bassin du Lac Supérieur s'est élevée à 63.800.000 tonnes de minerai sur un total de 74.000.000 tonnes pour l'ensemble des Etats-Unis,soit les 85/100. Les conditions géologiques sont des plus favorables à l'exploitation. Les transports par bateaux permettent d'amener directement le minerai jusqu'au centre industriel de *Pittsburg*.

Les districts sont les suivants :

Districts	Production en millions de tonnes (1909)	Réserves en millions de tonnes
Mesabi Range	29,6	3.100
Menominee	4,3	80
Gogebic	4,5	95
Marquette	4,5	110
Vermilion Range	1,2	60

Les chiffres des réserves sont discutables ; car ils sont évalués en tenant compte des minerais jusqu'à une grande profondeur : minerais plus pauvres que ceux que l'on exploite actuellement, et minerais qui ne seront accessibles industriellement que si les conditions économiques de la région sont modifiées. Il faut ajouter, à la région du Lac Supérieur, le *Colorado* et, dans l'Est, l'*horizon silurien de Clinton*.

FRANCE. — Sur une production de minerais de 51 millions de tonnes (1929), le *bassin lorrain* fournit la presque totalité (46.600.000 tonnes). L'exploitation des minettes a pris, en Meurthe-et-Moselle, un développement considérable dans les années qui ont précédé la guerre et, depuis, elle s'est accrue de toute la production de la partie du bassin qui, autrefois sous le régime allemand, a fait retour à la France.

Les minerais siluriens de *Normandie*, connus depuis longtemps à Saint-Rémy, représentent 1.800.000 tonnes (1929) ; leur extraction s'est rapidement développée (400.000 tonnes en 1919). Ceux de *Bretagne-Anjou*, produisent 530.000 tonnes (1929).

Les *Pyrénées-Orientales* donnent 170.000 tonnes environ (1929).

Enfin il existe quelques régions secondaires : *Gard*, *Haute-Marne*, *Aveyron*, *Ardèche*, *Indre*, *Ariège*.

Il faut ajouter à la production française, celle de l'*Algérie*, 2.196.000 tonnes (1929).

ALGÉRIE. — Le département d'*Oran* produit environ 580.000 tonnes (*Tafna*, appartenant à la C^ie^ de *Mokta-el-Hadid*). Le département de *Constantine* fournit 1.200.000 tonnes ; celui d'*Alger*, 450.000. Les grands gisements algériens constituent une réserve considérable. Les gisements de la *Tunisie* et du *Maroc* sont également appelés à se développer : *Tunisie*, 972.000 tonnes en 1929.

ALLEMAGNE. — Le centre principal de la production de minerais de fer était, avant la guerre, la Lorraine qui fournissait 14 millions de tonnes ; depuis la guerre, c'est la *Westphalie* (fer du *Siegerland*). En outre, la

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Bavière possède une couche profonde ferrugineuse d'altération ancienne. De même la *Hesse*. L'Allemagne fait venir la plus grande partie des minerais qu'elle traite de Suède, d'Espagne, d'Algérie, de Terre-Neuve.

GRANDE-BRETAGNE. — Le *Cleveland* (minerais phosphoreux) fournit, à lui seul, la moitié de la production anglaise. Le *Cumberland* et le *Lancashire* produisent presque toute l'autre moitié (minerais pour Bessemer). Ils sont en voie d'épuisement. L'*Irlande* (Antrim) a aussi des minerais alumineux. On importe, en outre, beaucoup de minerais riches et purs.

ESPAGNE. — Le district de *Bilbao* a, depuis 1885, produit 150.000.000 de tonnes. Il est en voie d'épuisement. Il exporte presque toute sa production en Allemagne, en Belgique, en Grande-Bretagne.

Le district d'*Oviedo*, dans les Asturies, qui paraît renfermer de grandes quantités de minerai, est à peine exploité à cause des grandes difficultés de transport.

La région d'*Almeria*, de *Carthagène*, fournit des minerais à l'exportation. Dans l'ensemble, l'Espagne est grosse productrice de minerais : 6.550.000 tonnes en 1929.

RUSSIE. — Le centre principal est celui de *Krivoï-Rog* dans le S.-O. de la Russie ; ses minerais précambriens sont peu éloignés du bassin houiller du Donetz. Ils s'épuisent très vite. L'*Oural* est le siège d'une vieille industrie, aujourd'hui en reprise. Il faut enfin signaler les minerais phosphoreux de la presqu'île de *Kertch* en Crimée. Leur traitement est difficile et leur exploitation encore faible. Au total : 5.000.000 tonnes de minerais en 1930.

SUÈDE. — Le minerai de Suède a été universellement réputé pour sa pureté ; aussi l'exploitation des minerais phosphoreux a-t-elle été longtemps retardée, pour ne pas jeter le discrédit sur l'ensemble des minerais suédois. Aujourd'hui les principaux centres sont les gîtes phosphoreux de la Laponie suédoise : *Kirunavara* et *Gellivara*. A côté d'eux, il faut encore citer les gisements anciennement connus et exploités de la Suède centrale et méridionale : *Grängesberg*, *Norberg*, *Dannemora* (Au total : 11.235.000 tonnes de minerais en 1930).

NORVÈGE. — Les gisements se trouvent dans la partie septentrionale de la presqu'île scandinave. Les minerais siliceux et phosphoreux nécessitent une préparation mécanique et un briquetage. Si défavorables que soient ces conditions, une des mines de la région, située à la frontière russe, près du Cap Nord (*Sydvaranger*), a pris une certaine importance.

ANCIENNE AUTRICHE-HONGRIE. — Le minerai se rencontre dans le Silurien de la *Bohême* (Tchécoslovaquie), dans l'*Erzberg* styrien et carinthien (Autriche proprement dite). On peut citer aussi les districts du *Banat*.

ITALIE. — Le seul centre important est celui de l'*Ile d'Elbe*. Il est exploité depuis longtemps et sa production tend à baisser.

CANADA. — Les gisements canadiens prolongent ceux des Etats-Unis dans la région des *Grands Lacs*.

TERRE-NEUVE. — L'île de *Terre-Neuve* renferme outre des minerais sédimentaires, des réserves de titanomagnétites, peu exploitées jusqu'à présent.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

7. Réserves de minerais. — 1° *Minerais riches.*

Kirunavara et Gellivara, minerai à	60-70	% : Réserve de		700	millions de t.
Krivoï-Rog	»	» :	»	50	»
Bilbao	»	» :	»	60	»
Ile d'Elbe	»	»		peu important	

Total pour l'Europe : plus de : 810 millions de t.

Ces réserves étant en somme peu importantes par rapport à la consommation, les métallurgistes se sont inquiétés et ont cherché des minerais de fer sur les autres continents (Algérie, Inde, etc.).

2° *Minerais phosphoreux pauvres.* — Les réserves sont beaucoup plus importantes :

Lorraine : Réserve de 7 à 8 milliards de tonnes disponibles ;

Cleveland : 500 millons t. et 2.500 millions de t. de minerais à faible teneur.

Le Brésil, l'Inde, l'Afrique Centrale, la Chine doivent aussi recéler de grandes réserves de minerais. Enfin, il y a lieu de tenir compte des masses considérables de fer que la présence de l'arsenic, du titane, du chrome ou du nickel rend inexploitables actuellement et que les méthodes métallurgiques peuvent rendre utilisables dans un avenir plus ou moins rapproché.

B. — GÉOLOGIE DU FER

1. Principaux minerais. — Le fer a un rôle constant dans les roches. La teneur moyenne de 4,7 % augmente dans certains minéraux. Alors qu'une granite ne tient que de 0 à 5 %, un basalte peut tenir 15 %. Cette grande diffusion fait qu'une roche quelconque, prise au hasard, renferme des quantités déjà notables de fer, soit à l'état de silicates, soit d'oxydes, soit de sulfures.

Silicates. — Les combinaisons silicatées du fer, où ce métal s'associe au magnésium en une scorie ferro-magnésienne, sont nombreuses et se caractérisent par leur teinte sombre. Parmi ces minéraux, quelques-uns arrivent à une teneur élevée en fer. La *berthiérine* atteint 75 % de fer ; la *chamosite*, exploitée dans le Valais, 46 % ; l'*ilvaïte*, qui existe dans les minerais de l'île d'Elbe, 40 % ; la *hornblende*, les *péridots*, les *grenats* renferment jusqu'à 40 % de fer. Ces silicates sont exploités dans un certain nombre de cas ; ainsi la chamosite donne un véritable minerai oolithique ; l'ilvaïte est traitée à l'île d'Elbe (minerai bianco) ; les grenats des gangues silicatées des gisements du Banat sont exploités en même temps que la magnétite.

A côté de ces silicates très rarement utilisables, il s'est isolé, par suite de réactions diverses, un certain nombre de substances que l'on peut considérer à des degrés divers comme des *minerais de fer proprement dits* : ce sont avant tout les oxydes, puis le carbonate, les sulfures et le fer natif.

Oxydes. — Les principaux sont :

L'*oligiste* ou *hématite rouge* (70 %) : Fe^2O^3 ;

La *magnétite* (72 %) : Fe^3O^4 ;

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

La *limonite* ou *hématite brune* (60 %) : Fe^2O^3, $2H^2O$.

Ces oxydes se rencontrent d'une façon constante dans les roches avec des concentrations sur certains points.

Carbonate. — C'est la *sidérose* ou *fer spathique* qui tient 48 % de fer. Ce minerai tend à prendre de l'importance ; mais il faut commencer par le griller et cette opération entraîne des frais supplémentaires de traitement. Quand la sidérose existe, on passe généralement de l'oxyde au carbonate vers la profondeur.

Sulfures. — Les *pyrites* (FeS^2) et la *pyrrhotine* (FeS environ) ne sont pas utilisées directement comme sources de fer. On les emploie dans la fabrication de SO^4H^2 quand elles sont bien pures ; on en extrait fréquemment l'or et le cuivre qui leur sont associés. C'est secondairement qu'on utilise les sous-produits comme minerais de fer (après grillage).

Fer natif. — Enfin, le fer natif existe aussi dans les roches. Sa présence a été parfois discutée : on l'a confondu avec les météorites. On le rencontre cependant en masses qui peuvent atteindre 20 tonnes, dans les dolérites d'Ovifak (Groenland).

2. Principaux modes de gisements. — La cristallisation des minéraux ferrifères s'est faite selon les modes suivants :

1° par *scorification directe* dans la roche-mère elle-même, donnant naissance aux **gîtes d'inclusions et de ségrégations.**

2° avec l'*intervention de fumerolles*, les trois groupes de fumerolles ayant joué un rôle. Les fumerolles chlorurées ont mis le fer en mouvement à l'état de chlorures, puis d'oxydes (oligiste, magnétite) dans des **gîtes de départ immédiat** ; les sulfures ont donné naissance à des formations pyriteuses : **amas, filons** ; les fumerolles carbonatées (les dernières) ont constitué des **filons** de sidérose, relativement superficiels.

Puis, dans une phase ultérieure des réactions géologiques, les roches et minerais ferrifères ont subi une altération qui a pu, momentanément, faire passer le fer à l'état soluble (sulfates ou carbonates ferreux), pour arriver à le reprécipiter à l'état de sesquioxyde, soit directement et presque sur place par métasomatose, soit après transport à la mer ou à un lac par un phénomène sédimentaire. *Ces deux sortes de réactions, dissolution et reprécipitation, sont capitales pour le fer.* La plupart de ses minerais pratiques leur sont attribuables. Ces remises en mouvement ont pu porter sur des quantités énormes de fer. La superficie des continents émergés étant de 145 millions de km^2, en admettant seulement une profondeur moyenne de 20 mètres pour le niveau hydrostatique, c'est à peu près 3 millions de km^3 qui sont soumis à la circulation constante des eaux. Or la densité moyenne de l'écorce étant de 2,5 et sa teneur en fer de 4,7 %, c'est une masse de 350 milliards de tonnes de fer que les eaux météoriques peuvent progressivement remettre en mouvement après chaque étape géogénique. Ces remises en mouvement ont surtout eu lieu pendant les phases d'érosion intense qui ont suivi les grandes phases de plissement. On leur doit notamment la formation des **gisements sédimentaires** qui comptent actuellement parmi les plus importants des gîtes ferrifères par leur extension et leur facilité d'exploitation et de traitement, ainsi que les **gisements de concentrations continentales.** Ces mêmes remises

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en mouvement expliquent les altérations qui ont porté sur des gisements antérieurement formés pour constituer à leurs dépens les **chapeaux** de gisements pyriteux et les **gîtes de substitution dans les calcaires.**

En résumé nous rencontrons les types de gisements suivants :

1° Gîtes d'inclusions (peu d'importance pratique) ;

2° Gîtes de ségrégations en milieu surtout basique ;

3° Gîtes de départ immédiat et de contact (type Banat) ;

4° Imprégnations et amas [il s'agit de pyrite, non exploitable pour le fer. Ces amas ont été étudiés au chapitre du soufre] ;

5° Filons (oligiste, sidérose ou pyrite) et leurs formes d'altérations : chapeaux et gîtes de substitution à des calcaires ;

6° Gisements sédimentaires ;

7° Gisements de concentrations continentales.

3. Cyles des minéraux ferrugineux. — Par suite des phénomènes de dissolution et de reprécipitation, d'oxydation et de réduction, d'hydrata-

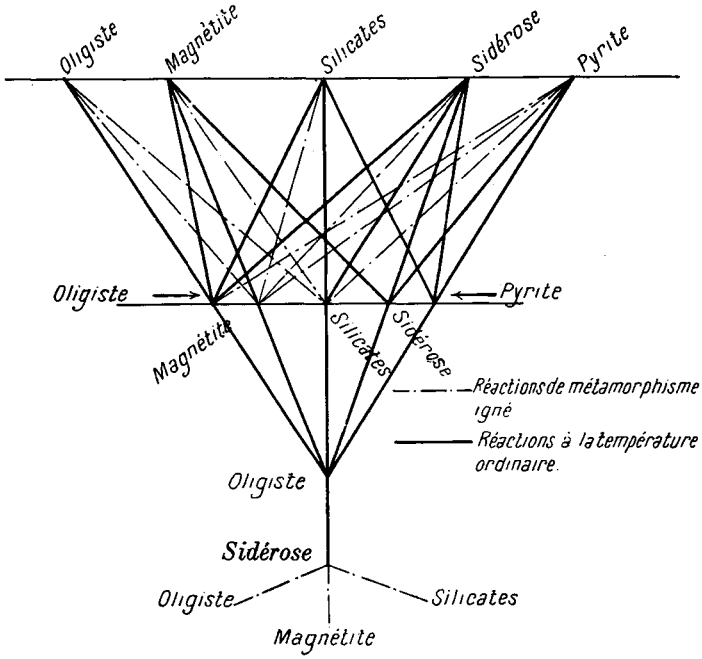


Fig. 81. — Schéma destiné à montrer les cycles de transformation des principaux minerais de fer (à lire de haut en bas).

tion et de déshydratation, le *fer est incessamment mobile* et ses multiples combinaisons sont susceptibles de passer des unes aux autres, selon un cycle plus ou moins compliqué et réversible quand les conditions extérieures se modifient. Aucune de ces combinaisons ne peut être considérée comme définitive.

Le schéma ci-contre (fig. 81) représente la nature de ces transforma-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

tions qui peuvent s'accomplir, soit à la température ordinaire, soit avec intervention ignée.

A la **température ordinaire,** la *magnétite* peut se transformer en oligiste par l'action des eaux chargées de chlorures, ou en sidérose ; on ne connaît guère de cas de transformation en silicates. Les *silicates* peuvent rester à l'état de silicates ou passer à l'état d'oligiste ou de pyrite. La *sidérose* peut donner naissance à de l'oligiste, à des silicates, à de la pyrite. Ce cycle de métasomatose aboutit toujours en fin de compte à l'*oligiste,* qui peut lui-même se transformer en *sidérose,* laquelle d'ailleurs n'est pas stable et tend à repasser à l'état d'oligiste.

La **voie ignée** peut donner comme types extrêmes de l'*oligiste,* de la *magnétite* ou des *silicates.*

Le phénomène est donc très complexe et il faut, dans chaque cas particulier, se rendre compte du cycle parcouru.

La *magnétite* s'est produite en milieu réducteur ; elle a pu cristalliser directement dans les roches ou venir de l'oligiste par réduction. On la trouve sous forme compacte ou en grains au milieu de l'oligiste (par exemple dans les minerais suédois).

L'*oligiste* peut être une forme primitive de cristallisation dans les roches ; il peut aussi résulter de l'oxydation de la magnétite ou de la déshydratation de la limonite ou de la réduction du sulfate formé aux dépens de la pyrite.

La *sidérose* peut être un minerai de scorification directe. Plus souvent elle résulte d'une transformation de la pyrite en milieu calcaire. Mais elle tend à s'oxyder en surface. De là, la composition des filons pyriteux encaissés dans des calcaires : dans la zone d'oxydation, on y trouve de l'oxyde de fer ; au-dessous, du carbonate ; dans la zone profonde, sous le niveau hydrostatique, de la pyrite. Le plus souvent, la forme filonienne n'est plus visible et les sels de fer ont donné des amas plus ou moins compliqués dans le calcaire. Dans quelques cas, d'ailleurs assez rares (pays de Siegen), la sidérose existe en filons au milieu de terrains non calcaires et cela jusqu'à de grandes profondeurs.

4. Substances accessoires des minerais de fer. — L'étude des corps accessoires qui accompagnent les minerais de fer a un intérêt à la fois théorique et pratique : elle aide à comprendre la genèse des minerais qui les renferment, en même temps qu'elle enseigne si ces substances accessoires doivent être recherchées ou évitées. Nous allons étudier successivement le rôle des impuretés que l'on rencontre le plus fréquemment.

a) GANGUES NORMALES. — 1° *Chaux.* — La chaux est, en principe, un élément *favorable* dans un minerai de fer, puisqu'elle contribue à donner une plus grande fusibilité aux laitiers. On a souvent recherché tout particulièrement les minerais à gangue calcaire. Quand un minerai ne renferme pas de chaux, on lui en ajoute sous forme de castine. Dans certains cas, c'est la présence d'une gangue calcaire qui a fait exploiter des minerais à faible teneur (20 à 25 %). Toutefois la chaux abondante a naturellement l'inconvénient de diminuer la teneur du minerai.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Elle peut exister sous deux formes : les carbonates (calcite, dolomie, ankérite) ou le phosphate, forme plus anormale et parfois nuisible.

Elle entre dans les minerais sédimentaires, où elle a surtout une origine organique, et dans les minerais encaissés au milieu des calcaires : dans ce dernier cas, elle provient des terrains encaissants.

2° *Silice.* — La silice peut être originelle et résulter de la sédimentation même (grains de quartz clastiques ; débris d'organismes siliceux : radiolaires, diatomées, spicules d'éponges...) ; mais cette silice n'est jamais abondante. Le plus grande partie de la silice associée aux sédiments ferrifères provient d'introductions lentes et de concentrations postérieures. Toutes les réactions qui éliminent la chaux peu à peu dans les minerais sédimentaires ont pour effet d'apporter et de concentrer la silice, qui a tendance à se déposer autour des débris organiques. Le phénomène de silicification semble particulièrement développé, quand il y a métamorphisme.

Il en résulte des types de minerais présentant des mélanges d'oligiste avec de la silice secondaire et que l'on appelle improprement des jaspes, des silicates, etc. Comme exemples, nous citerons les *jaspilites du Mesabi Range* (Lac Supérieur), à aspect zoné et rougeâtre, les *agatisés* de l'*Ardèche et du Gard*, les *quartzites ferrifères de l'Anjou.*

Ce phénomène d'introduction de la silice est analogue à celui qui produit des *jaspes* rouges ou brunâtres, au contact des minerais de manganèse.

Tous les minerais siliceux sont difficilement fusibles ; il faut leur ajouter des castines.

3° *Alumine.* — L'alumine se concentre en même temps que le peroxyde de fer dans les formations superficielles. Elle est nuisible au-dessus d'une certaine teneur. Certains minerais présentent une teneur considérable, qui les fait plutôt considérer comme des alumines ferrugineuses que comme de véritables minerais de fer. Les minerais de fer en grains montrent des types de passage aux latérites et aux bauxites.

L'alumine s'est déposée également sous forme d'argile dans les sédiments ferrifères.

b) Métalloïdes toujours nuisibles. — 1° *Phosphore.* — La proportion du phosphore est très variable même en des points voisins d'un même gisement. Elle joue un rôle essentiel dans la vente des minerais de fer. On divise industriellement les minerais de fer en 3 groupes :

α) *Minerais non phosphoreux* à moins de 0,02 % P. Ils sont d'excellente qualité et sont très recherchés pour le Bessemer. Ils se présentent en général :

a) Sous forme de lentilles intercalées dans des terrains métamorphiques et cristallophylliens (Scandinavie, Mokta-el-Hadid). Ou le phosphore a été absent de ces minerais dès le début ou il a été éliminé par le métamorphisme. A cet égard la présence du calcaire paraît avoir joué un rôle important dans la déphosphoration naturelle ;

b) A l'état de minerais ayant subi des réactions superficielles (Mesabi Range, Vermilion, etc.) se superposant, ou non, à un métamorphisme ancien. Ces minerais sont parfois réduits en poussière et exploitables au moyen d'excavateurs. Ils sont fréquemment silicifiés ;

c) Sous forme de produits de substitution à des calcaires. Les filons sul-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

furés originels contiennent peu de phosphore, de même que les terrains calcaires encaissants ; les minerais résultants sont donc très peu phosphoreux (Bilbao, Pyrénées, Ile d'Elbe, Canigou, etc.).

β) *Minerais très phosphoreux* à plus de 0,1 % P. Ce sont généralement des minerais sédimentaires non métamorphisés, mais ayant subi une minéralisation postérieure au dépôt : c'est ainsi qu'ils se présentent souvent sous forme d'une lumachelle dont les fossiles sont transformés en minerai. Tels sont les minerais de Kertch en Crimée, au milieu desquels se sont produites des cristallisations de phosphate de fer et où il est certain que le phosphate est d'origine organique ; ceux de Lorraine associés à des couches de coquillages, ceux de Clinton (Etats-Unis).

Dans quelques cas, il semble que le phosphore ait aussi une origine interne (Kirunavara, Oural).

γ) *Les minerais moyennement phosphoreux* (entre 0,02 % et 0,1 % P). Ils sont moins recherchés ; ils ne peuvent être traités que par mélange avec l'une ou l'autre des catégories précédentes et leur valeur est, par ce fait, beaucoup moindre. Ils se présentent dans les mêmes conditions que les minerais du groupe α. La teneur en phosphore peut tirer son origine des terrains encaissants. Ainsi les minerais de la Tafna en Algérie doivent leur peu de phosphore aux schistes en contact.

En résumé, le phosphore est le plus souvent d'origine organique. Tous *les minerais sédimentaires* ont dû être phosphoreux. Ils ne le sont plus, quand ils ont été l'objet d'actions de métamorphisme ou de métasomatose, notamment quand ils ont subi l'influence de terrains encaissants calcaires. Dans certains gîtes associés à des roches éruptives acides et constitués par une sorte de *ségrégation avec commencement de départ* (Kirunavara), l'apatite a pu être apportée de la profondeur en même temps que le fer. Dans le cas de *filons* où le fer a été déposé à l'origine sous forme de sulfure, le phosphore fait défaut ; toutefois il a pu être introduit ultérieurement en petite quantité par les terrains encaissants. Enfin, au cours d'actions métamorphiques, le phosphore a pu être amené postérieurement au fer par des fumerolles chloro-fluorées en rapport avec des venues granulitiques (Suède, Altaï).

2° *Soufre.* — Le soufre est une impureté si gênante que l'on abandonne le plus souvent dans une mine les parties sulfureuses. En Lorraine, par exemple, il existe des couches entières pyritisées, d'une couleur verte, qui ne sont guère exploitées. Le même fait se reproduit dans les gisements filoniens où les oxydes de fer sont accompagnés fréquemment de blende, galène et pyrite comme à Dannemora. Quelquefois les parties inférieures de certaines mines des Pyrénées sont riches en galène.

3° *Arsenic.* — Les minerais de fer arsenicaux résultent de l'altération du mispickel. On ne les observe que dans les gisements provenant de venues sulfurées. Ils sont généralement inutilisables, comme ceux du Nord de la Tunisie (Tabarka). Ces minerais constituent des réserves considérables pour le jour où on saura mieux les traiter.

c) Métaux associés. — 1° *Titane.* — Il en est de même des gisements très importants de titanomagnétite, à 10-14 % TiO^2, en Suède (Routivara), à Terre-Neuve, dans les monts Adirondacks, qui sont actuellement inexploitables. Ce sont des minerais de ségrégation basique. Le titane

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

rend le minerai très difficilement fusible. Des roches, le titane passe dans leurs produits d'altération (argiles, bauxites) : les minerais accompagnés d'argile ou formés par concentration au sein d'argiles (Berry) sont donc aussi un peu titanifères.

2° *Manganèse.* — Il augmente la valeur des minerais de fer. On a reconnu son importance dès le début du traitement au Bessemer. Il est très fréquent aussi bien dans les sédiments que dans les ségrégations et les filons. Il existe en quantité notable dans les gisements de fer qui ont subi une altération, surtout au voisinage des calcaires ; on passe quelquefois (Ile d'Elbe) à de véritables gisements superficiels de manganèse.

3° *Cobalt.* — Associé fréquemment au manganèse et au nickel, il n'existe qu'en traces très faibles (surtout dans les minerais de ségrégations basiques). Sa présence est plutôt nuisible. Il a tendance à se concentrer dans certains minerais d'altération.

4° *Chrome.* — Il est fréquent dans les minerais de ségrégation. Sa présence en faible proportion rend inutilisables les grandes masses de minerai à 2 et 3% de Cr de l'Ouest-Africain. Au contraire, à 6 ou 7%, la présence du chrome donne des qualités spéciales. Les Américains réussissent à traiter, par petites quantités, des minerais venant de Cuba à faible teneur en chrome.

5° *Vanadium.* — La teneur en vanadium est proportionnelle à celle du phosphore.

6° *Divers.* — La présence du *Cu*, *Zn*, *Pb*, est parfois très gênante. Celle du *Mo* et du *W* est avantageuse quand ces métaux existent en traces très faibles.

5. Distribution géographique des minerais de fer.

a) *Inclusions. Ségrégations.* — Ces gisements se trouvent dans les régions à magmas granitoïdes, au milieu des *plates-formes primitives* qui ont subi une érosion profonde. Il y a donc une couronne de gisements de cette espèce autour du pôle Nord, en Norvège, en Suède, en Finlande, en Sibérie et au Canada. Il en existe aussi dans l'Afrique australe et au Brésil.

b) *Filons.* — Les filons jouent un rôle métallurgique insignifiant : Ils se trouvent dans les régions moins profondément érodées, disloquées par les plissements hercyniens et alpins. Dans les chaînes plus anciennes, plus usées, ils ont été enlevés par l'érosion et n'apparaissent pas.

Les filons ne sont utilisables que lorsque leur altération superficielle, accompagnée ou non par une substitution en terrain calcaire, a concentré le fer en amas à l'état de sidérose ou d'hématite.

c) *Gîtes sédimentaires.* — Ces gisements se sont produits dans les périodes qui ont suivi les grands plissements et en bordure des zones plissées : dans le Silurien, le Carbonifère, le Lias. C'est la remise en mouvement des sels de fer par l'érosion qui a coloré les grandes épaisseurs de grés détritiques rouges formés après les ères de plissements (Keewenawien, Dévonien, Permien et Trias). Il est à remarquer qu'en Europe où les plissements se sont succédés par bandes parallèles du Nord au Sud, les gisements de fer sédimentaires sont, en moyenne, d'autant plus récents que nous allons vers le Sud.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

6. Description des principaux gisements.

I. — Gites d'inclusions.

Ils constituent un type *plutôt théorique* que pratique. Ils ne sont exploitables que s'ils ont été réduits, par érosion, à l'état de sables tels que ceux recueillis naguère sur certaines plages du Japon. Les sables à magnétite ont joué un rôle dans les métallurgies primitives (bords de la Mer Noire).

Dans ces inclusions on trouve plusieurs sortes de minerais :

a) On a trouvé le *fer natif* dans la dolérite d'**Ovifak** (*Groenland*) et dans les météorites où il s'accompagne de péridot, de phosphure de fer et de 20 % de nickel environ.

b) La *magnétite* existe dans presque toutes les roches, où elle a cristallisé pendant les deux temps de consolidation. Elle apparaît surtout dans les silicates ferro-magnésiens (pyroxène, amphibole, mica) et même dans les feldspaths. Ces inclusions sont très développées au **Japon** dans un granite kaolinisé à 2 % de magnétite titanifère et en **Nouvelle-Zélande** sous forme de sables à magnétite.

c) L'*oligiste* existe surtout dans les roches acides en association avec les micas : il donne la couleur rose à l'orthose et violette aux porphyres. On en trouve des inclusions dans certaines bombes volcaniques.

II. — Gites de ségrégation basique.

Les ségrégations ont donné quelques gîtes industriels, souvent épuisés aujourd'hui. Ces gisements, très purs en phosphore, se sont formés, surtout en *roches basiques*, par une véritable opération métallurgique qui a concentré les éléments ferrifères vers le centre en même temps que le péridot et le titane. Le fer y est toujours à l'état de *magnétite*.

Le gisement de **Taberg** (*Suède*) dans un massif de gabbro (hypérite à olivine) en est un exemple typique (fig. 82). Le fer, le titane et le vanadium se sont ségrégés au centre, tandis que les feldspaths calciques (plagioclases) ont gagné la périphérie. Il y a passage progressif du gabbro à l'amas de titano-magnétite par l'intermédiaire de péridotite à magnétite.

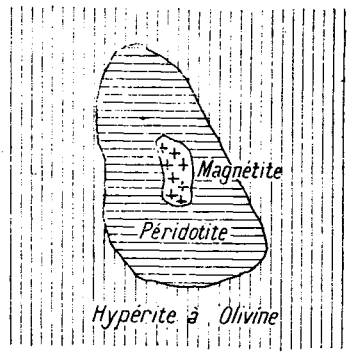


Fig. 82. — Schéma du gisement de Taberg.

On constate, de même, la présence du titane dans les minerais du gisement de **Routivara** (Suède), l'un des plus gros amas de fer du globe, inexploité jusqu'ici. Il se trouve dans un massif de gabbro. On observe, comme dans le cas de Taberg, une concentration progressive des éléments vers le centre ainsi que le montre le tableau suivant :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

	Zone centrale (minerai)	Zone intermédiaire	Zone périphérique (roche)
SiO_2	4 %	47 %	54 %
Al_2O_3	6,4	23	29
TiO_2	14,25	0,25	0,4
Na_2O	0,3	3	4,5
CaO	0,6	7	10
MgO	4	8,6	0,4
Fe_3O_4	68	6,5	0,6

Le minerai de la zone centrale est une titano-magnétite avec spinelle et accessoirement de la pyrrhotine.

Ce grand amas de Routivara a, d'ailleurs, subi des dislocations mécaniques qui lui donnent une allure de brèche ; peut-être la ségrégation est-elle antérieure au métamorphisme de la région et aux plissements huroniens.

Ce type se retrouve : 1° dans les gisements **finlandais**, dans la mine de *Välimäki*, au Nord du lac Ladoga où l'on rencontre une magnétite titanifère dans un gabbro ; 2° dans les gisements *canadiens* à **Terre-Neuve.** Là, les minerais de ségrégation, qu'il ne faut pas confondre avec les minerais dévoniens de la même île, tiennent en moyenne 65 % Fe et jusqu'à 16 % TiO^2.

Dans les plates-formes analogues de l'hémisphère Sud, les gisements du **Brésil** et de l'**Afrique Australe** (Bushveld) présentent des gabbros, des hypérites, des norites, etc., avec ségrégations de fer.

D'autres gisements de ségrégation existent, dans des conditions différentes, dans les terrains de la zone alpine. C'est par exemple celui de **Cogne,** dans le *Val d'Aoste*, sur les flancs du massif du Grand Paradis ; il ne permet que des exploitations rendues difficiles par l'altitude (2.300 mètres). Le plus grand de ces amas ne contient d'ailleurs que 300.000 tonnes.

A **Alnö** (Suède), on trouve des syénites néphéliniques avec des ségrégations d'ilménite et de fer titané qui sont un véritable type de passage entre les ségrégations basiques et les gisements du type suivant.

III. — Amas associés a des roches acides ou neutres

Gîte de Kirunavara (*Suède.*) — Situé en Laponie, il présente une masse de minerai englobée dans des porphyres acides et son origine est très discutée ; il paraît dériver directement des porphyres encaissants. Cette relation se retrouve dans l'Oural, la Sibérie, etc...

Kirunavara est le gîte le plus septentrional de la Laponie suédoise. Connu depuis longtemps, il n'est accessible que depuis l'ouverture du chemin de fer (1906) qui le relie : 1° à la Baltique et par suite à l'Allemagne, 2° à la mer du Nord et, par suite, à l'Angleterre. Il est exploité à ciel ouvert par gradins successifs et joue un rôle important sur le marché européen.

Les minerais forment une énorme lentille, très allongée (fig. 83), ayant

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

l'apparence d'un filon, encaissée entre deux porphyres très analogues. La magnétite, plus dure que les porphyres encaissants reste en relief. La

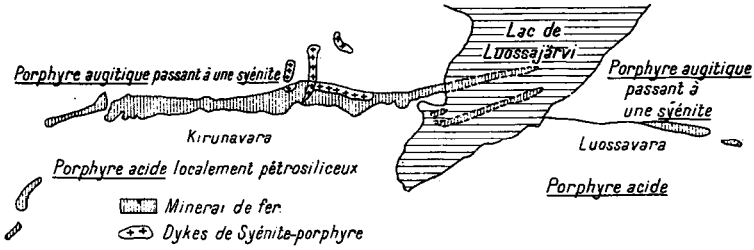


Fig. 83. — Carte géologique schématique de Kirunavara et de Luossavara (Svappaland, Suède).

masse présente une certaine inclinaison, de sorte que son affleurement est supérieur à son épaisseur (fig. 84) ; elle a d'ailleurs une tendance à se coincer en profondeur. Elle se continue au Sud sous le lac.

On a pu établir un cubage exact du gisement qui a été reconnu par une centaine de sondages. La section totale du gisement est de 436.000 m². C'est la plus grande connue ; Routivara n'a qu'une section de 300.000 m². Chaque approfondissement de 1 mètre fournit 1.900.000 tonnes, c'est-à-

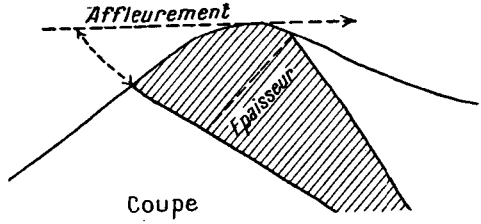


Fig. 84. Coupe verticale schématique de Kirunavara

dire plus que la production annuelle. Le cube total de la partie du gisement située au-dessus du niveau du lac est de 240.000.0000 tonnes. Le cube existant jusqu'à 300 mètres au-dessous du niveau du lac serait de 672.0000.000 tonnes. Etant donné la production annuelle, le gisement durerait environ 300 ans.

Le minerai est une magnétite à grain très fin, gris d'acier, avec un peu d'oligiste. La teneur en phosphore est très forte et très variable ; elle est comprise entre 0 et 4 %. Selon cette teneur, on fait, pour la vente, 6 catégories de minerais. Le minerai moyen a la composition suivante :

Phosphore	1,5 %
Fer métal	63,0

De plus on y trouve des traces très faibles de titane, mais pas la moindre trace de soufre. Ce gisement diffère beaucoup du type des ségrégations basiques. La coupe montre, en effet, une série de terrains ayant un aspect

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

de quartzites, des conglomérats ferrifères ; le gîte de minerai est entre deux couches de porphyre. Parmi les innombrables théories émises (lambeau sédimentaire coincé, filon, etc.), *la plus vraisemblable est qu'on se trouve en présence d'un départ voisin de la ségrégation.*

Gisements de l'Oural. — Les minerais de fer forment des gisements analogues à ceux de Laponie, mais souvent complètement dénués de phosphore. Ils sont tous englobés dans des syénites augitiques ou des porphyres fluidaux, sodiques comme à Kirunavara.

Il est intéressant de mettre en évidence l'action exercée sur les lambeaux de calcaires avoisinants ; la plus grande partie des minerais paraît s'être substituée à des calcaires au contact ou à l'intérieur des porphyres. On a donc un type de passage aux minerais de substitution.

Les *gisements de l'Oural* ne donnent lieu qu'à une exploitation industrielle peu intense à cause de la difficulté des transports. De plus il n'existe aucun autre combustible que le bois ; les tentatives d'établissement de grands centres industriels ont donné peu de résultats jusqu'ici. Cependant le gouvernement soviétique les recommence aujourd'hui avec les moyens spéciaux dont il dispose.

1° Le gisement de *Troïtsk* est le plus septentrional. Il est situé dans le Dévonien, surmonté en discordance par le Permien, terrains traversés tous deux par de nombreuses roches éruptives : microgranites, gabbros, pyroxénites. Les minerais appartiennent à deux types : *a*) le type de ségrégation, au milieu d'une pyroxénite à olivine, la kosvite, en blocs de magnétite atteignant 200 kilogrammes. A partir du noyau central, la roche s'appauvrit progressivement en magnétite et se charge de plus en plus en plagioclases ; sur la périphérie on trouve une teneur normale en fer et en magnésie ; *b*) des gisements de magnétite dans les terrains primaires prédévoniens contenant des lambeaux de calcaires transformés en cornéennes, pyroxénites, etc., et traversés par des roches éruptives. Quelques gisements de magnétite tendent à s'interstratifier dans les terrains encaissants, en formant une série de bancs très analogues à des filons-couches et enclavés dans les cornéennes. Mais l'étude d'ensemble indique, à l'évidence, qu'il s'agit d'une introduction postérieure.

2° Plus au Sud, la mine du *Mont Blagodat* présente des syénites et porphyres ayant traversé les terrains sédimentaires : le minerai forme des nids, amas, intercalés dans les roches sodiques ; il est associé à une roche métamorphique à minéraux (épidote, grenats, chlorite) qui a dû être originellement calcaire.

3° Le gisement du *Mont-Vissokaya*, le plus important, renferme de la chalcopyrite associée à de la magnétite. Il y a eu des phénomènes d'altération superficielle ; en profondeur, le gisement est en rapport avec des syénites passant à des porphyres et avec des calcaires. Il s'agit encore d'un départ immédiat, mais avec passage aux types du Banat et de Traverselle. Le minerai renferme un peu de phosphore et de vanadium. Un gîte voisin montre le phosphore visible sous forme d'apatite.

4° Le gisement du *Mont Magnitnaya* est un amas de magnétite associée à des grenats et à des épidotes, inclus dans des orthophyres à épidote.

En résumé, ces gisements de fer de l'Oural sont des gîtes de ségrégation dans des syénites sodiques avec accentuation de minéralisation au voisi-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

nage des calcaires. Ceux-ci, par un phénomène de départ immédiat, se transforment en silicates accompagnés de minerais de fer et chalcopyrite.

Gisements sibériens — Les gisements sibériens du groupe de l'*Iénisséï* sont des amas en stockwerks de magnétite, dans des roches syénitiques et orthophyriques : tels sont les gisements d'*Irba* et d'*Akabansk*. Dans d'autres groupes, on trouve des « quasi-filons » comme au Mexique (Sonora) et dans le Sud des Etats-Unis (Arizona).

Les gisements de *Nikolaïevsk* sur l'Angara forment des veines incluses dans des porphyrites à olivine, avec géodes de quartz, magnétite, calcite et autres minéraux d'introduction postérieure (gypse). La magnétite semble être le résultat de la réduction de l'hématite ; elle affecte souvent la forme inusitée de gros pisolithes. Il y a eu d'abord sécrétion très nette du fer par les porphyrites à olivine à l'état de carbonate ou de chlorure, puis remise en mouvement postérieure des éléments ferrugineux.

IV. — Gîtes au contact des calcaires (Type Banat)

Ce sont des gîtes de départ au contact de terrains calcaires. Ils représentent l'exagération du type de l'Oural. Ils ont eu une importance industrielle assez grande.

Gisements du Banat. — Ils se trouvent dans une zone de terrains calcaires, jurassiques et crétacés, injectés de roches dites « banatites », qui comprennent des gabbros, diorites, diorites quartzifères, etc. Ces roches traversent, en les métamorphisant, des schistes cristallins et des calcaires plissés. Ceux-ci sont saccharoïdes et il s'est produit, entre la banatite et le calcaire, une brèche à éléments calcaires, chargée de quartz, de calcite cristallisée, de feldspath, de grenats, d'amphibole et de pyroxène. Cette gangue silicatée contient des lentilles, irrégulièrement disséminées, de minerais très divers : magnétite et chalcopyrite notamment.

On a donc 2 types de gisements, ceux de fer et ceux de cuivre. On observe, de plus, la trace de phénomènes hydrothermaux sous forme de blende et galène abondantes. Le zinc est particulièrement typique dans ces gisements : il s'accompagne de chalcopyrite et de galène et est parfois exploitable. On peut remarquer que, dans l'Oural, il y avait peu de blende et pas de galène.

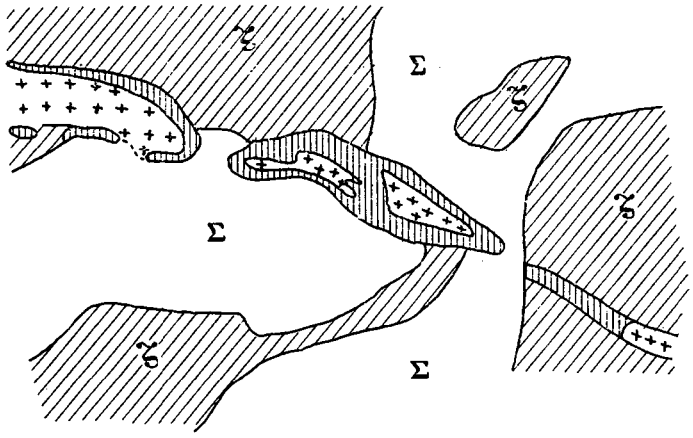
On s'est demandé, autrefois, l'origine de la minéralisation. Les analyses chimiques des terrains encaissants, des roches et des minerais ont montré nettement qu'il y avait eu apport métallifère par les roches éruptives.

Il semble bien que la présence d'une gangue silicatée démontre l'intervention de fumerolles, qui ont laissé, par places, des géodes minéralisées.

Le Gisement de Traverselle (*Piémont*). montre une accentuation des caractères précédents vers le type des gisements de cuivre. C'est un gîte classique d'où proviennent de nombreux minéraux : sidérose, chalcopyrite, magnétite, oligiste, calcite, dolomie. L'exploitation industrielle, tantôt pour le fer, tantôt pour le cuivre, est très ancienne : on la reprend de temps en temps, sans grand succès, et actuellement, seul le gisement voisin de *Brosso* est l'objet d'une petite exploitation. La séparation du fer et du cuivre se fait par un triage magnétique. Le minerai est constitué par des cristaux de

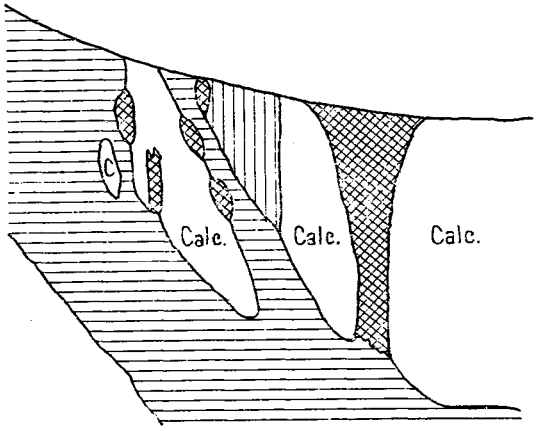
Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

magnétite, en rapport avec les roches post-crétacées (diorites) dont la série doit être rapprochée des tonalites de l'Adamello et de la zone d'Ivrée.



ζ Micaschite
Σ Syénite
Calcaire métamorphique
Gangue avec amas métallifères.

Fig. 85. — Carte géologique schématique de la région de Dognaska.



C. Calc. Calcaire
Gangue grenalifère.
Gangue à 5 à 10 % de minerai.
Minerai.

Fig. 86. — Coupe de la mine Paulus.

Le long des roches, au contact des calcaires, il y a des cristallisations de magnétite avec accentuation des cristallisations géodiques, augmentation de la teneur en cuivre et développement d'une gangue silicatée. Il semble

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

qu'il y ait eu, de plus, intervention de phénomènes hydrothermaux beaucoup plus récents.

Dans les **gisements de l'Arizona**, l'apport devient très net ; on y voit l'extrémité filonienne des gisements sous la forme de géodes. On passe successivement des amas aux filons, puis aux géodes : la démonstration de l'apport du fer par la roche est complète.

V. — Filons

Dans le cas du fer, ils jouent un rôle très faible au point de vue industriel. Ils ne prennent de l'importance qu'en milieu calcaire, celui-ci donnant lieu à des phénomènes de substitution. On y trouve les minerais sous la forme d'oligiste, de sidérose, de pyrite.

a) *Filons d'oligiste.* — C'est l'exagération du type de Kirunavara ; le filon est englobé dans la roche d'où il provient, incrustant les fissures de cette roche et se prolongeant un peu dans les terrains encaissants. La cristallisation s'est faite grâce à l'intervention des fumerolles chlorurées. Dans certains cas, la pyrite est associée à de l'oligiste ou à de la magnétite, le long de veines de magma granitique, et elle est accompagnée d'un peu de fluorine ou d'apatite.

Au Missouri (*Etats-Unis*), on trouve, au milieu des porphyres quartzifères, deux types de ce genre. *Iron Mountain*, amas de 10 à 12 mètres encaissé dans les porphyres, se rapproche un peu du type de Kirunavara. *Pilot-Knob*, au contact des porphyres et des calcaires encaissants, doit plutôt être comparé au type du Banat.

Dans les Vosges, à Framont, des filons d'oligiste avec magnétite, un peu de pyrite et une gangue de quartz, traversent des granites et sont en rapport avec des microgranites. Ce gîte n'a jamais eu de valeur industrielle. La pyrite, d'après M. Lacroix, serait le minerai originel.

b) *Filons de sidérose.* — Ils jouent parfois un rôle réellement industriel, comme à *Siegen* (Allemagne), berceau de l'industrie métallurgique du fer dans le bassin houiller de la Ruhr, et comme à *Allevard* (*Isère*).

A **Siegen** (*Allemagne*), les gisements ont une tendance à prendre l'apparence de filons-couches, interstratifiés localement dans les terrains sédimentaires. Nous sommes là sur un plateau primaire transformé en pénéplaine par une très ancienne érosion et où les phénomènes d'altération semblent avoir été très prolongés. Les gîtes sont encaissés dans les schistes argileux du Dévonien inférieur. Le plan des filons montre que la région est criblée d'une multitude de petites fractures parallèles et perpendiculaires, généralement courtes.

Les gisements sont fort anciens et sont peut-être en relation avec des venues de diabases dévoniennes. La sidérose est accompagnée de sulfures métalliques (blende, galène, pyrite, chalcopyrite). Elle constitue le principal minerai. Son origine donne lieu à plusieurs théories : on peut songer à invoquer une carbonatation par altération de surface datant de l'époque primaire et ramenée ultérieurement en profondeur par un phénomène tectonique ; mais la sidérose se prolonge à de grandes profondeurs ; on est descendu jusqu'à 635 mètres sans la voir disparaître. On est donc conduit

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

à admettre que la sidérose est plutôt le minerai originel. Toutefois les mines paraissent s'épuiser en profondeur : cette théorie reste donc discutable.

Partout l'altération de la sidérose a donné en surface de l'hématite et des oxydes manganésifères. On trouve, au milieu des faisceaux de petits filons, quelques fractures puissantes et continues, qui sont celles exploitées : ainsi le Eisenfelder Zug a été suivi sur 15 kilomètres de long et exploité jusqu'à plus de 600 mètres de profondeur. Certain filon occupe une fracture nette entre les phyllades et la grauwacke.

A **Allevard** (*Isère*), il existe tout un système très développé de filons tertiaires de sidérose associée à la chalcopyrite. Ils traversent les schistes cristallins et pénètrent localement dans le Houiller et le Trias. Ils ont parfois une allure interstratifiée. Les mines furent exploitées primitivement

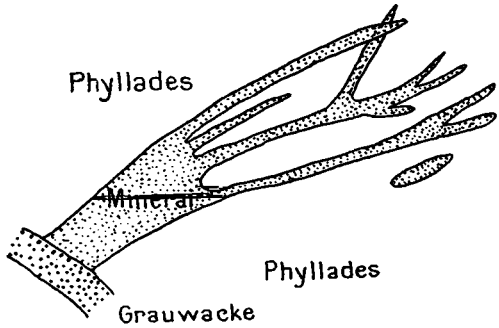


Fig. 87. — Plan du gîte de Stahlberg, près Musen.

pour le cuivre ; mais, progressivement, on a trouvé des minerais sans cuivre.

Dans ce groupe d'Allevard, à la *Taillat*, on a exploité un certain nombre de filons de sidérose ; leur production (50.000 tonnes par an autrefois) baisse progressivement (6.000 tonnes en 1910).

Dans le Nord-Ouest de l'Espagne, au milieu des schistes cambriens et siluriens ou dans les calcaires carbonifères, existent des filons-couches où l'hématite passe en profondeur à de la sidérose.

c) *Filons de pyrite.* — Les filons de pyrite sont très nombreux ; mais ils ne sont pas exploités pour le fer, à peine pour le soufre (Voir le chapitre du Soufre). Ils ne deviennent utilisables que dans deux cas : lorsqu'il s'est produit des *chapeaux de fer* aux affleurements des filons, ou lorsque, en milieu calcaire, il s'est formé des *gisements de substitution* avec transformation de la pyrite en carbonate et en oxydes.

VI. — Chapeaux de filons pyriteux

Ces gîtes étaient constitués originairement par de la pyrite et ont subi des transformations résultant d'une oxydation superficielle.

Les types les plus nets se trouvent en *Algérie, Tunisie, Maroc.* Dans toute l'Afrique du Nord, on rencontre en effet des gisements du type B.P.G., avec accessoirement du mercure, dispersés en une multitude de petites

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

fractures. Dans le cas spécial du fer, il y a eu souvent concentration du métal dans un chapeau important qui ne paraît pas avoir toujours des racines profondes. On en connaît plusieurs exemples, parmi lesquels on peut citer : la Tafna et l'Ouenza.

Gisement de la Tafna ou de Beni-Saf. — Il est situé à l'extrémité Ouest de l'Algérie, appartenant à la Compagnie de Mokta-el-Hadid et constituant l'un des principaux gîtes filoniens d'Algérie. Il est exploité depuis 1873 (à ciel ouvert). On en extrait, par an, 400.000 tonnes d'un minerai extrêmement pur, ne contenant, pour ainsi dire, pas de phosphore et de soufre (sauf quand il s'y trouve des débris de schistes encaissants) ; ce sont des minerais de première qualité.

Ils occupent des poches filoniennes. Des schistes anciens d'âge problématique se trouvent à leur mur. Au toit (fig. 88), il y a, soit une brèche, soit des calcaires liasiques (?). La présence de ceux-ci indique que les phénomènes de substitution ont joué ici un certain rôle. Une coupe à plus grande échelle montre qu'il s'agit en réalité d'un amas situé dans un axe

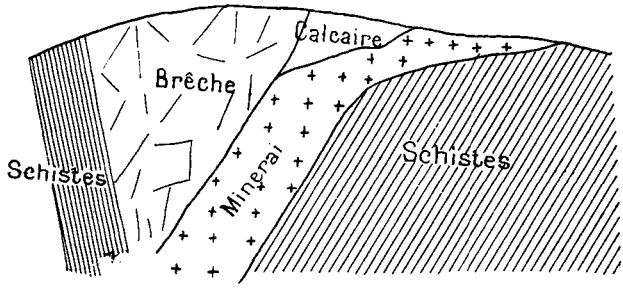


Fig. 88. — Coupe schématique du gisement de Beni-Saf.

synclinal rompu : cet amas ayant 700 mètres × 100 mètres. Le gisement est certainement d'âge récent (Miocène inférieur) : certains filons en relation avec lui traversent le Crétacé et l'Eocène, tandis qu'on trouve des fragments de minerai dans les poudingues du Miocène moyen. Il y a, au voisinage du gisement, une série de roches volcaniques (basaltes) récentes, avec lesquelles le gisement est peut-être en relation.

Le minerai est de l'hématite brune ou bleuâtre, très friable, contenant 2 à 3 % de manganèse.

Le gîte se compose de plusieurs affleurements : R'ar-el-Baroud, Camerata et quelques autres, plus petits, disséminés.

Gisement du Djebel-Ouenza. — Les gisements de l'Algérie Orientale sont analogues, en particulier celui du Djebel-Ouenza, au Nord de Tébessa, qui se présente sous la forme d'une espèce de calotte dans l'Urgo-Aptien. On y a trouvé d'abord des traces de Cuivre qui ont attiré l'attention et ont fait concéder primitivement le gîte pour le cuivre. Mais ce dernier métal est solidaire du fer et les travers-bancs d'exploration ont mis en évidence que le fer dominait de beaucoup et que le cuivre jouait un rôle insignifiant. Les

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

cubages ont donné des estimations, d'abord évaluées à 100 millions de tonnes, puis ramenées à 30 millions de tonnes.

On connaît des gisements analogues à *Bou-Kadra*, à hauteur de Tébessa ; le chapeau de fer contient de la barytine et de la calamine ; la puissance est estimée à 6 millions de tonnes.

Gisements de Tunisie. — Les gîtes de *Nefzas*, près *Tabarca*, en Tunisie, sont d'énormes masses de minerais de fer, formant en surface des rochers à allure parfois ruiniforme. Ils avaient suscité tout d'abord un grand enthousiasme ; mais leur teneur sensible en arsenic (moyenne 0,07 %) provenant sans doute de l'altération du mispickel a paralysé lomgtemps l'exploitation. Celle-ci tend à être reprise à l'heure actuelle où les métallurgistes prohibent moins absolument l'arsenic. Le minerai un peu manganésifère est très pur en soufre et en phosphore (Teneur 55 % Fe).

Autres gisements. — Des gîtes analogues existent probablement au *Maroc* où il y a de nombreux Djebel-Hadid. Le gisement de *Goa*, dans l'*Inde* (Côte occidentale), qui appartient à la Compagnie de Mokta-el-Hadid, est encore du même type ; il se trouve au contact de calcaires et dans des conditions d'exploitation facile ; on l'a estimé à 100 millions de tonnes.

VII. — Gisements de substitution a des calcaires

Ces gisements sont parmi les plus importants au point de vue industriel. Le phénomène de substitution au calcaire a permis une grande extension du minerai ; il a assuré une forte teneur en fer, une épuration en phosphore et en soufre, un enrichissement en manganèse : toutes conditions favorables.

La majorité, sinon la totalité, de ces gisements ont une *origine filonienne* et sont produits, presque sur place, en *milieu calcaire* par une remise en mouvement restreinte des sels de fer empruntés à ces filons ou amas filoniens ; ils imprègnent le calcaire auquel ils se substituent. C'est un cas d'altération continentale, ancienne ou récente, due à la circulation prolongée des eaux d'infiltration, réalimentées sans cesse en oxygène et en acide carbonique au contact de la surface. La minéralisation s'est faite en partant de fissures, gagnant autour de celles-ci à la façon de taches d'huile qui marchent à la rencontre les unes des autres et laissant des noyaux inattaqués de calcaire stérile au milieu du minerai. Il en résulte des *amas* extrêmement *irréguliers* et déchiquetés, plus ou moins obliques par rapport à la stratification et où la substitution a été d'autant plus complète que les phénomènes d'altération ont agi plus longtemps. Ces amas sont entourés d'une auréole, d'abord de calcaire ferrugineux (appelé *rohwand* en Styrie, à 8-10 % de fer), puis de calcaire cristallin et saccharoïde, comme celui qui a été soumis à des actions chimiques : il y a donc passage progressif des minerais à haute teneur au calcaire stérile. La substitution est bien mise en évidence par ce fait que les fossiles ont été également transformés en sidérose ou en hématite. En résumé, le calcaire encaissant contribue activement, comme masse poreuse, à la constitution finale du gîte. Par contre,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

dans les bancs de schistes, entre lesquels se trouve intercalée la masse de calcaire, la fracture filonienne s'éparpille, comme toujours, en petites veines qui ont tendance à suivre la stratification, mais il n'y a jamais constitution d'amas et les minerais, moins riches, n'y sont généralement pas exploités.

Minéralogiquement, les minerais de substitution sont formés : en profondeur, de *sidérose*, forme plus ancienne ; aux affleurements, d'*hématite*, produit de la décomposition de la sidérose. D'ordinaire, c'est l'hématite rouge, avec plus ou moins d'hématite brune, qui prend le développement le plus considérable. Tous ces minerais sont remarquablement purs en soufre et en phosphore et fréquemment chargés de manganèse. Quand on s'enfonce, on peut passer de la sidérose à la pyrite non transformée.

A côté du type que nous avons envisagé et qui est le plus fréquent : transformation directe et sur place de filons pyriteux, il en est d'autres beaucoup plus rares. Par exemple, pour certains gisements à allure sédimentaire, le fer a pu être introduit postérieurement dans une strate calcaire, s'y concentrer et s'y étendre progressivement, s'y transformer en oxydes. Enfin il est possible que les venues métallifères aient agi immédiatement sur le calcaire et l'aient imprégné dès leur arrivée. Cette explication (qui est celle des théories anciennes) ne doit probablement s'appliquer qu'à des cas restreints quand il y a eu véritablement action ignée et métamorphique avec développement de minéraux spéciaux. C'est un type qui se rapproche du type Banat.

Gîtes d'Angleterre. — Les gisements du *Cumberland* et du *Lancashire* constituent les principales réserves de l'Angleterre en minerai pour Bessemer, tenant 50 à 60 % de Fer. La production annuelle est de 1.700.000 tonnes. Le centre de fabrication de l'acier de la région se trouve à *Barrow*, au voisinage de mines de charbon.

Le district, situé sur le flanc occidental de la chaîne pennine, comprend un système ordovicien, du Carbonifère et du Permien. L'Ordovicien est constitué par des schistes et des grès, avec bancs calcaires où la substitution est peu importante. Le Carbonifère (Dinantien) est formé par de gros bancs calcaires intercalés dans des schistes. Des discordances, dues aux mouvements calédoniens et hercyniens, séparent l'Ordovicien du Carbonifère et celui-ci du Permien. Des failles nombreuses recoupent le Carbonifère.

Les venues métallifères (fer, etc...) sont postérieures au Houiller mais sont recouvertes par le Trias et l'Infra-Lias ; elles sont donc nettement datées de la fin du Carbonifère ou du Permien. Il y a tout un système complexe de filons du type B.P.G., sur lesquels ont été ouvertes une série de mines qui étaient importantes comme mines de plomb (Derbyshire) dès l'époque romaine ; puis on a exploité le zinc, négligé par les anciens ; enfin les gisements de fer ont pris une grande extension.

Ces derniers forment des bancs intercalés *dans le calcaire carbonifère* ; aussi a-t-on soutenu leur origine sédimentaire. Cependant les coupes (fig. 89 et 90) montrent nettement qu'il s'agit d'une imprégnation postérieure en relation avec une faille. A Parkside, par exemple, la faille qui met en contact le Carbonifère avec les terrains imperméables du Silurien est

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

jalonnée d'amas irréguliers, de même que le contact entre le calcaire dinantien et les grès superposés (Millstone grit). De plus on y trouve de nombreux fossiles, d'âge carbonifère, transformés en hématite.

Les minerais consistent en hématite, bleue ou rouge, compacte, conte-

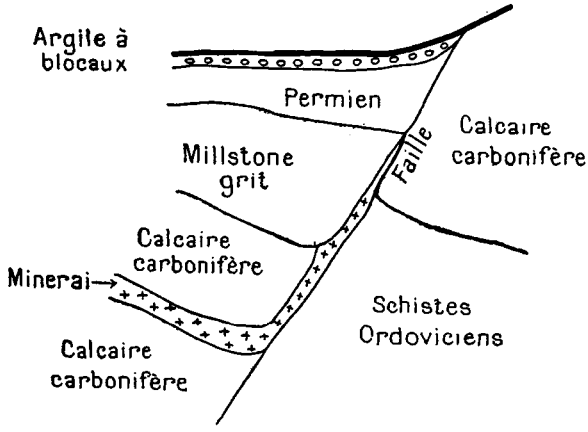


Fig. 89. — Coupe schématique de la mine de New-Parkside (Cumberland).

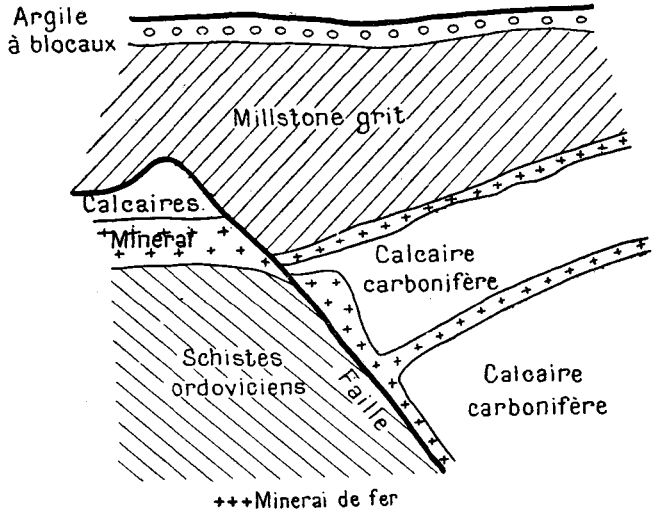


Fig. 90. — Coupe schématique de la mine de Parkside (Cumberland).

nant une très forte proportion de fer (56 %), à texture souvent concrétionnée et globulaire, sans trace de soufre ni de phosphore. Ils sont accompagnés de quartz, calcite, dolomie, pyrolusite, sidérose.

Gisements de Bilbao. — Ces gisements ont donné lieu à de nombreuses interprétations ; ils sont effectivement très complexes à cause des phénomènes d'altération et de remise en mouvements postérieurs, qui se sont

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

même produits jusqu'à l'époque actuelle. En réalité, il s'agit de remplissages filoniens, d'âge probablement éocène, qui recoupent des calcaires, des schistes, des marnes, des grès et qui, suivant les cas, ont donné des minerais d'allure différente. Ceux-ci, très beaux dans les calcaires, où il y a eu concentration du fer, surtout au contact des schistes, sont de qualité inférieure dans les marnes ; il n'y a presque rien dans les schistes et les grès.

La région forme un grand anticlinal aptien N.W.–S.E. dont les flancs sont recouverts par du Cénomanien et du Sénonien. Les principaux gisements sont en amas *dans le calcaire aptien* qu'ils arrivent à remplacer presque totalement : en particulier, le long de certaines failles (notamment à *Sommorostro* et *Triano*). Dans les grès et les psammites aptiens, inférieurs aux calcaires, existent également quelques filons-couches. La

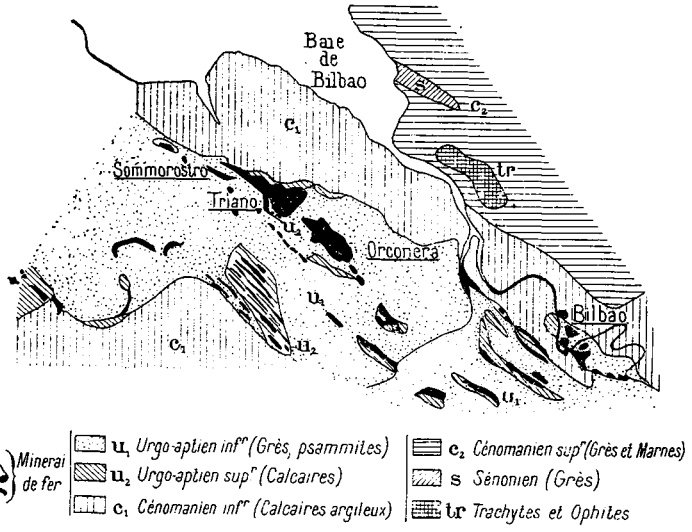


Fig. 91. — Carte schématique des principaux gisements de fer des environs de Bilbao.

présence du fer dans des terrains d'âges divers indique qu'il n'est pas contemporain des couches encaissantes.

Le minerai comprend trois variétés :

1° Le *Campanil* (cloche), sonore, rouge, pourpre. Il contient un peu moins de fer (48 à 58 %), mais un peu plus de manganèse ; son traitement est plus facile. Il se vend plus cher que les autres variétés et est très recherché.

2° La *Vena*, minerai de surface, à aspect terreux, résultant manifestement d'un remaniement superficiel où le fer seul a été remis en mouvement. C'est, par suite, un minerai calcaire très pur et très fusible, qui était fort recherché dans les métallurgies primitives (49 à 60 % de fer). On le trouve en amas isolés ; mais il est surtout en veines au milieu des autres minerais.

3° Le *Rubio*, concrétionné, de couleur brune ou jaunâtre, souvent souillé d'argile et à structure caverneuse. Il a une allure plus filonienne.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Il est presque dépourvu de chaux et siliceux (jusqu'à 14 % de SiO^2 ; 48 à 58 % de fer).

Les minerais les plus riches ont été trouvés dans le calcaire : « La caliza es la madre del mineral », disent les mineurs espagnols. Cependant, dans les psammites et les grès, par exemple à Orconera, il existe un peu de minerai (du rubio) ; on en trouve aussi parfois dans les marnes.

Ces gisements de Bilbao ont passé longtemps pour ne fournir que des oxydes de fer ; mais, actuellement, une notable proportion de la production est due à de la sidérose qui tend à dominer en profondeur.

Tous ces minerais ont joué un grand rôle dans la métallurgie du fer ; ils en constituent, depuis 1875, une des principales ressources. Leur production annuelle dépasse 6 millions de tonnes. On estime qu'il reste 50 millions de tonnes à exploiter et que, par suite, leur durée est très limitée.

Gisements des Pyrénées. — On connaît de même, sur toute la longueur de la chaîne des Pyrénées, un grand nombre de mines de fer que l'on considère comme des manifestations filoniennes éocènes ayant pris leur caractère apparent et leur valeur industrielle par l'effet de substitutions à des calcaires encaissants. Parmi elles, on peut citer **Rancié** (*Ariège*) où l'exploi-

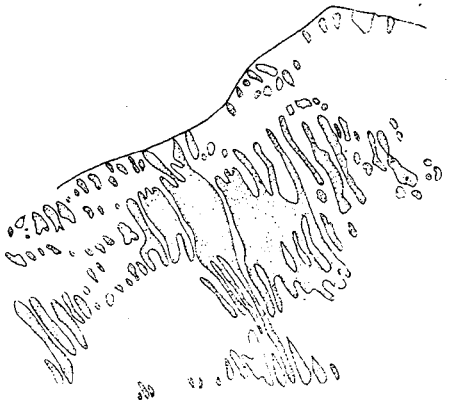


Fig. 92. — Schéma des lentilles de minerai de Rancié (Ariège) représentées par une série de coupes verticales parallèles, projetées sur un même plan.

tation remonte au Moyen-Age et qui est aujourd'hui à peu près épuisée : sa production est très réduite.

Le gisement de Rancié, dans les calcaires dévoniens, est constitué par une série de lentilles presque verticales dont on a représenté la projection sur la fig. 92. Ces lentilles sont reliées les unes aux autres par des veinules de minerai ou des filonnets d'argile ferrugineuse ; elles ont des formes très irrégulières et profitent des diaclases et des plans de joints du calcaire ; elles se coincent vers le bas. On les a vidées successivement. Un travers-blanc, effectué à 50 mètres au-dessous de la coupe figurée, a retrouvé les mêmes couches chargées de carbonate de fer. L'amas principal a une section triangulaire de 500 mètres de long, 900 mètres de haut, avec une épaisseur moyenne de 10 à 15 mètres.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Le minerai de ces gisements, dit *ferru*, est classique dans les régions pyrénéennes ; c'est une hématite brune ou rouge, mélangée d'une gangue siliceuse, ayant parfois une allure concrétionnée fibreuse à nombreuses cavités. Le manganèse le recouvre d'enduits, ou même de stalactites.

On trouve aussi un minerai carbonaté, dit *noir*, décomposé et transformé en hématite un peu hydratée, à surface noirâtre.

Les mineurs réduisent toutes les variétés à 3 types : Les *Mines noires ou douces* riches en manganèse et constituées surtout par du carbonate plus ou moins décomposé ; les *Mines fortes ou fermes*, c'est-à-dire les hématites ; les *Mines pauvres ou anis*. En profondeur, la proportion de sidérose augmente et on voit apparaître, comme éléments accessoires, un peu de galène et de blende.

Vers l'Est des Pyrénées, se trouve un autre groupe, celui du **Canigou**, très anciennement connu et qui a repris récemment un grand développement. En 1930, ces gisements ont produit 170.000 tonnes d'hématite et de carbonate, celui-ci provenant des couches profondes atteintes

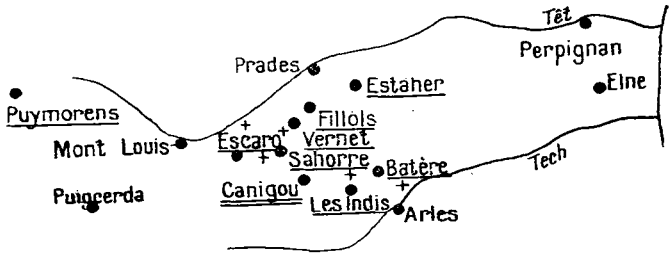


Fig. 93. — Carte des gisements des Pyrénées-Orientales.

récemment. Ils sont très purs en phosphore. Il y a là une série de gisements éparpillés sur les flancs Nord et Sud du massif granitique du Canigou, entre la Têt et la Tech ; ils se trouvent dans les calcaires siluriens ou permo-carbonifères, mais se prolongent parfois dans les schistes. On a soutenu leur origine sédimentaire, mais leur forme columnaire montre qu'il s'agit bien de minerais de substitution développés principalement au contact des calcaires et des schistes ; ils forment, soit des minerais à l'aspect de stalactites, soit des minerais compacts. Ils se ressemblent tous, constituant des amas irréguliers dans les calcaires et des couches de nombre, de teneur et d'épaisseur variables. A **Fillols**, l'exploitation a porté sur 5 couches. Le minerai est de l'hydroxyde de fer, passant progressivement à du fer spathique, contenant 53 à 55 % de fer et 3 ou 4 % de manganèse.

Il faut noter que, dans beaucoup de ces gisements, on voit apparaître de la galène, ce qui prouve qu'il s'agit de minerais du type B.G.P.

Dans le **Nord des Corbières**, il y a une série de gisements du même genre (*La Caunette*), parfois exploités pour argent ; ce sont des chapeaux de fer ayant jusqu'à 100 mètres d'épaisseur ; à la base se trouve un peu d'argent qui disparaît ensuite progressivement quand on s'enfonce.

On peut citer aussi des gisements analogues en **Espagne** dans les provinces de *Murcie*, d'*Alméria*, de *Saragosse*, de *Jaen* (abandonnés actuel-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

lement), dans le **Gard** (Hauts-fourneaux à *Tamaris* et à *Bessèges*) et dans **l'Ardèche.**

Styrie et Carinthie. — Ces gisements constituent la principale ressource de l'Autriche en minerais riches. Ils sont associés à des calcaires à crinoïdes du Dévonien inférieur et se substituent à eux sur une grande étendue et à un même niveau. Aussi plusieurs géologues allemands ont-ils pensé qu'il s'agissait de gisements d'origine sédimentaire. En réalité, ces minerais de fer sont au contact des schistes triasiques au toit et des grauwaches au mur ; de plus la puissance de l'Erzberg près d'Eisenerz, qui atteint 200 mètres et qui paraît avoir 730 mètres à cause de l'inclinaison des couches, diminue rapidement et se réduit à presque rien sur leur prolongement.

On trouve d'abord en surface les minerais oxydés, connus depuis l'antiquité (Pline l'Ancien) et exploités pendant tout le Moyen-Age. Progressivement on est arrivé en profondeur à des minerais carbonatés, englobant des noyaux stériles où la teneur en fer diminue progressivement ; on passe des minerais à haute teneur au calcaire stérile par l'intermédiaire de calcaires ferrugineux tenant 15 à 25 % de fer et appelé rohwand. Les parties les plus ferrugineuses suivent nettement les diaclases. Il y aurait donc eu imprégnation de calcaires dévoniens par des eaux chargées de fer et maintenues en pression sous un toit de schistes imperméables.

Silésie. — On y connaît des amas très nombreux, irréguliers et restreints, d'hématite brune dans les dolomies du Muschelkalk, en relation directe avec le niveau plombo-zincifère qui sera étudié ultérieurement.

Ile d'Elbe. — Les gisements appartiennent au même type, mais avec des caractères un peu différents. Ils constituent pour l'Italie une grande ressource en fer.

Il y eu là des *réactions métamorphiques* très accentuées, avec un grand développement de silicates ; les oxydes ont recristallisé (oligiste spéculaire). De ce fait, le gisement a été tellement transformé qu'il est impossible d'affirmer si les réactions de substitution sont antérieures au métamorphisme ou si elles se sont produites en même temps que lui et à sa faveur. Dans ce cas, on aurait là un passage au type Banat.

La région a été soumise à des *charriages intenses*. En partant de l'Ouest, on trouve le grand massif granitique du Mont Capanne, puis des micro granites, ensuite une zone de roches vertes, puis des schistes lustrés et enfin, à l'Est, des terrains d'aspect primaire. Par suite de ces phénomènes de charriage, la région a dû être abaissée à une grande profondeur et métamorphisée ; le granite est d'ailleurs d'âge récent et sa venue est probablement liée aux phénomènes de métamorphisme.

Les minerais de fer sont localisés sur la côte Est, constituant une longue traînée Nord-Sud. L'exploitation remonte à une très haute antiquité (Etrusques), mais elle s'est faite sans méthode. On trouve, en certains points, des filons pyriteux parfaitement caractérisés et accompagnés de galène (donc du type B.G.P.) ; en d'autres, des formations de contact au voisinage des calcaires et des schistes. Le minerai classique

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

est de l'*oligiste*. Plus au Sud, il se produit un certain changement dans l'allure des minerais ; au lieu d'oligiste en paillettes, on trouve des *silicates* (amphibole, pyroxène, ilvaïte, épidote) dont l'exploitation a commencé depuis peu et où l'on rencontre des cristaux de magnétite et de protoxyde, de sorte que l'on pourrait les prendre au premier abord pour une roche encaissante. La teneur en fer est cependant assez forte (minerai *bianco*). Ces couches de silicates donnent l'impression d'avoir rongé le calcaire et il paraît y avoir eu un phénomène de substitution du fer au calcaire, avec formation ultérieure de silicates.

VIII. — Gisements d'origine sédimentaire

C'est surtout sous cette forme qu'on exploite le fer.

Les minerais d'origine sédimentaire ont une *allure assez différente suivant l'âge des terrains*. Dans les terrains cristallophylliens, on a surtout de l'oligiste et de la magnétite. Dans les formations primaires, en même temps que l'oligiste, se développe de l'hématite rouge. Celle-ci devient prédominante dans les terrains secondaires et s'y mêle plus ou moins à l'hématite brune qui domine dans les terrains tertiaires.

Les minerais présentent souvent la *structure oolithique*. Dans les gisements d'origine continentale (Berry), on a même des grains (pisolithes) gros comme des pois. La forme oolithique typique des minerais de Meurthe-et-Moselle se retrouve dans les minerais siluriens de Normandie et, avec un faciès métamorphique, dans ceux de Diélette (Manche) et même dans ceux du Lac Supérieur. Ce fait n'est, d'ailleurs, pas général ; mais il est très fréquent. Les oolithes sont liées entre elles par un ciment, dans lequel existent les mêmes éléments ferrugineux.

On relève, dans tous les gisements de cette nature, l'*abondance des fossiles* et la présence de phosphore qui augmente avec la quantité d'organismes. Dans les terrains plus anciens, ces fossiles deviennent moins visibles ; on n'en retrouve plus les indices qu'au microscope (Silurien de Normandie, Archéen des Etats-Unis).

Cette abondance de restes organiques indique que ces minerais sédimentaires (ou les matériaux devenus plus tard des minerais) ont dû se déposer dans des eaux dont la teneur en fer n'était pas susceptible d'empêcher la vie ; elle prouve donc que le *dépôt du fer ne doit pas être rigoureusement contemporain de la sédimentation*, mais qu'il y a eu remise en mouvement et pénétration du fer dans les fossiles et dans les oolithes calcaires préexistants. Quelques auteurs ont pensé que cette pénétration était d'origine filonienne et très postérieure (failles nourricières). Cela semble bien difficile à admettre. Il est plus probable que la pénétration du fer a dû se produire presque immédiatement après le dépôt calcaire originel. Ce fer pourrait provenir du démantèlement et de la remise en mouvement des gisements existant dans la région avoisinante ; la pénétration se serait faite dans certains cas avant que les sédiments destinés à devenir ferrugineux aient eu le temps d'être recouverts par d'autres dépôts postérieurs. Les oolithes calcaires se sont successivement et graduellement transformées en sidérose, puis en chlorite et enfin en hématite. A l'époque

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

actuelle on ne connaît absolument rien d'analogue ; les minerais de lacs et de marais, que l'on a souvent comparés aux minerais sédimentaires marins, sont tout à fait différents.

En général, tous les sédiments ferrugineux ont subi une *silicification* ultérieure, au fur et à mesure que s'opérait le départ de la *chaux*.

Nous allons, dans les descriptions suivantes, rattacher chacun de ces gisements à allure sédimentaire au niveau géologique où on le rencontre.

Ces minerais se trouvent dans des terrains d'âge quelconque appartenant à toute la série géologique ; mais ils sont concentrés *dans certaines phases postérieures aux phénomènes de plissements*, pendant la période d'érosion intense où s'opérait le démantèlement de la chaîne plissée. La concordance approximative est la même que pour les phosphates. C'est ainsi qu'ils sont très abondants au *Silurien* après l'érection de la chaîne calédonienne. Ils disparaissent presque pendant le Dévonien, le Carbonifère, le Permien et le Trias. Ils sont de nouveau abondants à la *base du Jurassique* quand la chaîne hercynienne eût été arasée et sont progressivement plus rares au Jurassique Supérieur et au Crétacé. Ils réapparaissent après la phase de plissement alpin, au *Miocène* et au *Pliocène*. Il

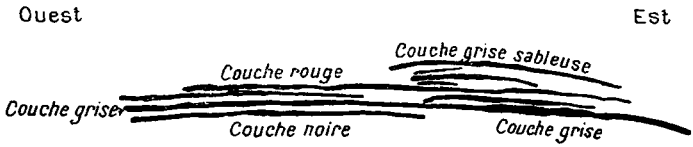


Fig. 94. — Coupe verticale schématique des gisements de minerai de fer du Luxembourg.

est probable que la destruction des chaînes montagneuses a mis en mouvement d'énormes quantités de fer.

D'autre part, les sédiments ferrifères semblent être liés à des conditions de dépôt sous une assez faible profondeur, par conséquent s'être formés à faible distance de la côte marine (par exemple 25 à 50 kilomètres). Leur origine continentale, au moins lointaine, n'est donc pas douteuse.

Dans ces gisements, une coupe montre généralement une *série de lentilles intercalées* dans d'autres formations et de dimensions quelquefois considérables (30 kilomètres) (fig. 94). Le fait s'observe en Lorraine (couches non plissées) et en Suède (couches plissées).

1. Minerais interstratifiés des terrains cristallophylliens. — Les terrains cristallophylliens des plates-formes primitives présentent une abondance spéciale en minerais de fer. Outre les gisements de ségrégation, déjà étudiés, qui sont liés aux roches éruptives, il en est d'autres, *interstratifiés* et très développés, qui sont disposés en *chapelets d'amas lenticulaires* par séries parallèles. Leur allure actuelle leur a été imprimée par les actions métamorphiques dues à un retour en profondeur. Il n'est pas douteux qu'un certain nombre d'entre eux proviennent d'anciens sédiments ferrugineux.

Ce type de gisements est bien représenté en *Suède*, sous forme de lentilles, très épaisses parfois, interstratifiées dans des gneiss, des leptynites,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

des hälleflints. Les minerais, composés d'oligiste et de magnétite, contiennent ou non du phosphore, suivant que le terrain encaissant originel était siliceux ou calcaire.

Gisement de Gellivara (*Laponie suédoise*). — Il est intercalé dans des hälleflints, des gneiss porphyroïdes, des gneiss à hornblende, etc.,

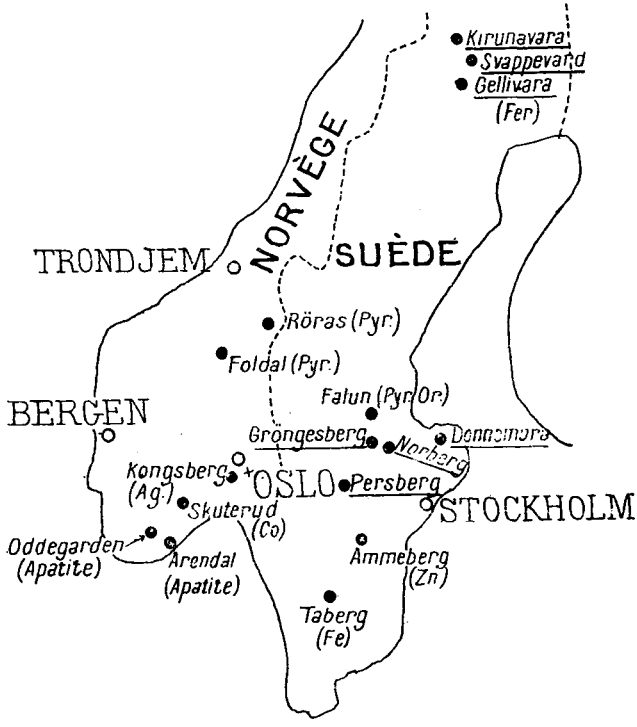


Fig. 95. — Carte des principaux gisements de Suède.
Les gîtes de Taberg, de Kirunavara et de Svappavara sont des gîtes de ségrégation. Le gîte de Gellivara est intercalé dans l'Archéen. Les gîtes des environs de Stockholm (Dannemora, etc.), célèbres autrefois, jouent un rôle insignifiant aujourd'hui, sauf Grångesberg qui exploite activement un minerai phosphoreux, non exploité antérieurement. On a marqué aussi ici quelques gisements d'autres matières.

c'est-à-dire dans toutes les roches que présente la série cristallophyllienne, quand celle-ci a englobé des calcaires.

Les amas métallifères se trouvent le long des zones de plissements et forment des traînées parallèles à la stratification, mais fortement sinueuses. Leur superficie horizontale est de 181.000 m². Comme les couches sont verticales, chaque mètre d'approfondissement donne 600.000 tonnes de minerais.

Dans la constitution de ces minerais, l'apatite joue un rôle considérable et on a, en les voyant, l'impression d'une roche granitoïde à magnétite et apatite. Une préparation mécanique et magnétique permet de séparer l'apatite, susceptible d'être vendue comme phosphate. Il y a là, de plus

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en certains points, de véritables filons de granulite avec apatite, exploités comme gisements de phosphate.

Le minerai est rarement une magnétite compacte, à grain fin comme celui de l'acier ; plus fréquemment, on trouve des masses d'oligiste cristallisé, en paillettes beaucoup plus fines (moins de 1 millimètre) que celles de l'île d'Elbe et disposées en cottes de mailles. On constate que cet oligiste a été transformé en magnétite en certains points, particulièrement le long des filons de quartz (minerai stellaire). Cette réduction s'explique par l'action d'hydrocarbures contenus dans ces filons de quartz; elle peut, d'ailleurs, être mise en évidence expérimentalement.



Fig. 96. — Carte schématique montrant la disposition des gisements de Gellivara. Les gisements forment deux longues zones principales, dont celle du sud n'est peut-être que le repliement de la plus septentrionale.

La teneur est de 60 à 70 % de fer ; celle du phosphore est très variable. Toute la région Nord-Est est très phosphoreuse ; la région Sud ne contient presque pas de phosphore. On distingue, dans les minerais, 5 qualités;

Minerai à moins de 0,05 de P, destiné au Bessemer ;
» tenant de 0,05 à 0,1 de P ;
» » de 0,1 à 0, 8 de P ;
» » de 0,8 à 1,5 de P ;
» » au-dessus de 1,5 de P.

Ceux qui dépassent 0,8 sont destinés au Thomas. Les intermédiaires sont moins directement utilisables et doivent être mélangés.

Les couches peuvent être très minces ; mais, en certains points, elles ont 160 mètres × 100 mètres de superficie et forment des lentilles que l'on a suivies sur plus de 50 mètres en profondeur. Elles s'effilent ou s'arrêtent brusquement au contact d'un plan de cassure. On y a trouvé quelquefois un peu de cuivre (*à Svappavara*).

Gisement de Grängesberg (*Suède*). — C'est aujourd'hui le troisième de la Suède : il est très analogue au précédent. Il contient des minerais phosphoreux, destinés à l'exportation, et d'autres, en contact avec des calcaires, très purs en phosphore, traités par les usines suédoises.

A **Dannemora** (*Suède*), où les gisements sont associés à des bancs calcaires, le minerai est toujours formé de magnétite fine et compacte, encaissée : soit directement dans le calcaire, soit dans une brèche avec skarn (grenat, amphibole, actinote, pyroxène). Cette magnétite est remar-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

quablement pure en phosphore et assez notablement manganésifère, mais elle contient des traces sensibles de sulfures.

Gisement de Mokta-el-Hadid (*Algérie*). — Fermée aujourd'hui, la mine est encaissée dans des terrains cristallophylliens, sur l'âge desquels on a discuté ; ils sont peut-être même d'âge éocène. Dans des schistes micacés et grenatifères, s'intercalent des lentilles de calcaire où se trouvent des amas de fer s'effilant pour passer latéralement au calcaire encaissant (fig. 97).

Les couches présentent, comme à Dannemora, une inflexion, où existait une énorme lentille de fer que la Compagnie de Mokta exploitait en tranchée. Cette tranchée entamait la lentille obliquement, de sorte que l'on avait exagéré son cubage ; au lieu de 30 millions de tonnes, on n'en a

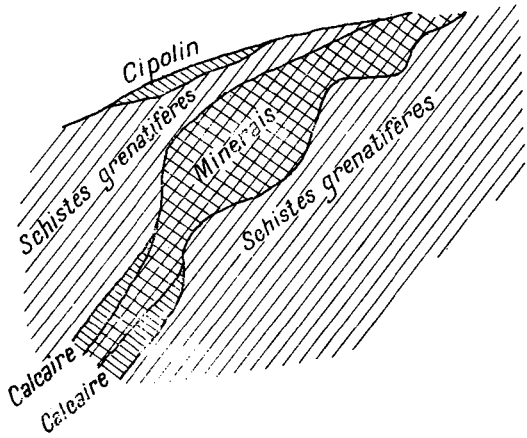


Fig. 97. — Coupe verticale N.-S. du gîte de Mokta-el-Hadid.

extrait que 6 à 7 millions. Cette lentille se poursuit vers l'Ouest par des bancs minces offrant en quelques points des renflements.

Les minerais de Mokta-el-Hadid sont des magnétites et des oligistes à 60-65 % de fer, très purs en phosphore et souvent manganésifères.

Gisement de Krivoï-Rog (*Russie*). — Situé au voisinage du bassin houiller du Donetz, ce gisement est le centre de l'industrie métallurgique russe.

Les minerais, encaissés dans les quartzites, sont de la magnétite et de l'oligiste ; certains sont très siliceux et de qualité inférieure : on a tous les passages de la magnétite à des quartzites à magnétite. On a trouvé toute une série d'amas interstratifiés (un de 30 mètres de puissance, un autre de plus de 80 mètres). Les minerais sont parfois si riches en silice qu'ils font penser aux jaspilites du Lac Supérieur.

La production est environ de 4 millions de tonnes ; la réserve, d'à peu près 80 millions. Il est possible, d'ailleurs, que les gisements se prolongent vers le Nord, sous les terrains crétacés, dans une région où l'on observe d'importantes anomalies magnétiques.

Gisements du Lac Supérieur. — Ils ont une importance très grande. Les premiers gisements étaient situés du côté de *Marquette* ; les plus importants sont aujourd'hui au N.-W. du Lac Supérieur (*Vermilion, Mesabi*).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les minerais les plus anciens se trouvent dans le niveau dit *Ontarien* ou *Keewatin* (niveau inférieur de Marquette). Au-dessus, séparés par une discordance, viennent, dans l'*Algonkien inférieur* ou *Huronien*, les minerais du niveau supérieur de Marquette et tous ceux de l'Ouest. Une nouvelle discordance les sépare de l'Algonkien supérieur ou Keweenavien, où se rencontrent les minerais de cuivre.

Les minerais ont des allures variables suivant les points. Ils ont passé par la forme sédimentaire oolithique ; mais, comme les terrains encaissants, ils ont perdu leur aspect primitif ; ils ont été recristallisés et métamorphisés. On a eu des types de minerais, analogues à ceux de la Suède, qui ont subi, en outre, de très longues altérations continentales ayant introduit de la silice, éliminé la chaux, concentré le fer en divers points. Les minerais ont ainsi pris la forme de *jaspilites*, formées de veines d'hématite alternant avec les jaspes. Ces phénomènes d'altération se sont prolongés jusqu'à nos jours, car il y a certaines relations entre la teneur en silice et la surface actuelle du sol. Ces minerais, par suite d'altération, ont subi des modifications locales : quelques-uns sont réduits en poussière et peuvent être exploités par excavateurs. Par endroits, on trouve aussi des concentrations d'argile. Il est probable que, dès le Huronien et le Keweenavien, des eaux se sont infiltrées, produisant toutes ces modifications.

D'autres hypothèses ont été émises. Les minerais de fer et les jaspes ont été considérés comme d'origine éruptive ou comme déposés dans des océans, agités par des volcans sous-marins, ou encore comme ayant pénétré par venues postérieures filoniennes dans des sédiments calcaires.

Les minerais ont une teneur en fer de 55 à 65 %. Leur teneur en phosphore est extrêmement variable, d'un point à un autre. Certaines couches atteignent 45 mètres d'épaisseur.

Autres gisements. — Des phénomènes du même genre s'observent au *Brésil*. Les *itabirites* du Brésil, très développées, sont des grès à oligiste, associés à des schistes ; elles n'ont été utilisées jusqu'ici que lorsqu'elles sont aurifères. Le fer et l'or qu'elles renferment semblent résulter de la transformation d'imprégnations pyriteuses. Elles sont recouvertes par les quartzites flexibles appelés itacolumites.

Au *Transvaal* on a reconnu des couches de minerais de fer encore inexploitées.

Dans la *Rhodésia* et le *Katanga*, il existe d'énormes masses d'oxyde de fer, restant en saillie, et très analogues, d'après les descriptions, à celles de la Suède.

Dans l'*Inde* (présidence de Madras), on en connaît également. Tous ces gisements constituent de précieuses réserves pour l'avenir.

2. Minerais siluriens. — Les minerais ont généralement conservé leur aspect primitif ; mais en certains points, ils ont été métamorphisés et ressemblent alors beaucoup à ceux de l'Archéen. On trouve ainsi des types de passage entre ces derniers et des minerais franchement sédimentaires.

Asturies.— Il y a, dans le Silurien de cette région, d'énormes gisements de minerais de fer qui sont encore à peine exploités ; car il faudrait construire 200 kilomètres de chemin de fer pour les amener au port d'embarquement.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

France — Les gisements siluriens français sont importants.

Ceux de **Maine-et-Loire** ont donné des résultats industriels assez médiocres. Les niveaux de minerais de fer, intercalés dans les quartzites du Silurien, y sont généralement recristallisés et très siliceux. Ces minerais se sont transformés à la surface et ont fourni des poches de minerais d'altération continentale du type Berry et des limonites ayant donné lieu à une série de petites exploitations, depuis l'époque préhistorique jusqu'à l'époque actuelle. Les scories en ont été recherchées dans ces dernières années.

Le bassin de **Basse-Normandie** est connu depuis longtemps par la mine de *Saint-Rémy*. Mais sa mise en valeur sérieuse ne remonte guère qu'à 1900. Une campagne de recherches a montré l'existence de bandes synclinales presque Est-Ouest, contenant des terrains siluriens (schistes et grès)

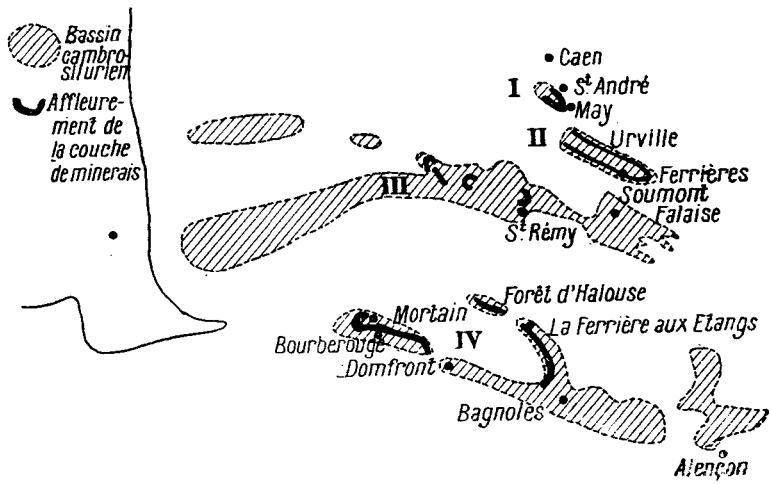


Fig. 98. — Gisements de fer de Basse-Normandie.
(Le Jurassique est supposé enlevé).

et sur les bords desquelles apparaît le minerai de fer en couches redressées. Ces bandes sont généralement recouvertes par du Jurassique à peu près horizontal. Quatre d'entre elles ont été mises en exploitation (fig. 98).

Le minerai a une structure oolithique. Il provient de la transformation progressive d'oolithes calcaires qui semblent avoir successivement passé par les stades : sidérose, chlorite et enfin hématite. A Saint-Rémy existe une couche entièrement transformée en hématite, de couleur rouge violacée, à 52 % de fer (2 m. 60 d'épaisseur) ; ailleurs le minerai est encore accompagné de chlorites ; la sidérose subsiste parfois, surtout en profondeur.

La teneur en phosphore, assez élevée, donne des fontes contenant 1,1 à 1,5 % de phosphore.

La production a passé de 100.000 tonnes à 1.800.000 tonnes (1929). Il en est résulté un grand développement du port de Caen.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Pays de Galles. — On y connaît de grands gisements de minerais phosphoreux dans le même niveau silurien.

Norvège. — Certaines mines, comme celle de **Dunderlandsdal** ou de **Salangen**, se trouvent au delà du cercle polaire ; mais situées sur le versant atlantique, elles sont exploitables grâce à la présence du Gulf-Stream qui adoucit le climat.

Les minerais forment. dans le Silurien, des bandes ayant une largeur de 3 à 10 mètres, atteignant parfois jusqu'à 100 mètres, sur plusieurs kilomètres de longueur. Ils ont l'inconvénient d'être siliceux. Aussi la plupart des exploitations ont dû cesser. Il fallut organiser la séparation magnétique, puis un briquetage ; les résultats ont été médiocres. Seule la plus septentrionale subsiste encore.

Bohême. — Dans du Silurien à facies nettement oolithique, on a suivi, sur 15 kilomètres, des minerais formés de chamosite qui résulte de la transformation de sidérose. La couche atteint sa plus grande puissance à **Nucic** (à l'ouest de Prague) : 16 mètres. L'exploitation aujourd'hui y est assez importante. Teneur en fer : 37 % ; en acide phosphorique : 1,5 à 2,5 %.

Etats-Unis. — Les minerais gothlandiens de **Clinton** sont une des grandes ressources des Etats-Unis. L'abondance des fossiles et des oolithes y est extraordinaire (Fossil-ore). Teneur moyenne en fer : 45-48 % ; en phosphore 1 %.

3. Minerais du Dévonien. — Les minerais s'y prolongent, mais leur abondance s'y atténue progressivement.

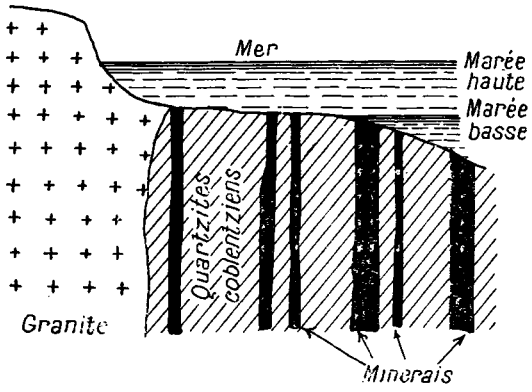


Fig. 99. — Coupe transversale du gisement de Diélette.

Diélette (*Manche*) : On y rencontre des minerais de fer intercalés dans le Dévonien métamorphique, au Nord du massif granitique de Flamanville. Ces minerais, très siliceux, consistent en oligiste et magnétite cristallisés (57 % de Fe) ; ils ont subi, au voisinage du granite, des actions métamorphiques, de même que les terrains encaissants ; toutefois M. Cayeux y a reconnu au microscope une structure oolithique et sédimentaire. Ils forment 6 couches verticales interstratifiées alternant avec des bancs de quartzites ; 3 de ces couches n'affleurent que sous la mer.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Des minerais de même âge se trouvent dans les *Ardennes*, où ils n'ont jamais donné lieu à une industrie bien importante.

Ceux des *Asturies* paraissent plus intéressants.

4. Minerais du Carbonifère. — Les minerais du Carbonifère ont un caractère un peu différent. Ils sont associés à la houille et se sont déposés, soit dans des cuvettes lacustres, soit dans des lagunes marines. Ils sont constitués presque exclusivement par de la sidérose, transformée en grande partie en hématite et qui subsiste seule toutes les fois que le gisement n'a pas subi une altération superficielle. Ils forment, soit des lits continus généralement noircis par de la houille, soit des nodules appelés improprement *sphérosidérite*. Les premiers constituent le *kohleneisenstein* des Allemands, le *blackband* des Anglais ; ils tiennent de 40 à 50 % de fer et sont ordinairement très phosphoreux, au point de passer progressivement au type des phosphates noirs. Les seconds, jaune clair, bruns ou noirs, se sont généralement formés autour de débris organiques qui ont servi de noyaux d'attraction ; les cristaux pyriteux y sont fréquents.

Bassin de la Ruhr. — La formation houillère de la Ruhr renferme, dans les couches inférieures, des dépôts interstratifiés de kohleneisenstein (40 %), à structure schisteuse et de couleur noire, qu'on avait longtemps pris pour des schistes houillers ; ils présentent par endroits une forte teneur en phosphore et passent même à de véritables phosphates noirs. Ils peuvent avoir au plus une épaisseur de 1 m. 50. Ces gisements fournissaient, en 1890, 180.000 tonnes ; ils sont abandonnés aujourd'hui.

Angleterre. — Le carbonate noir, ou blackband, peut y être considéré comme un des éléments constituants du terrain houiller. On en connaît dans le *Pays de Galles* et surtout en **Ecosse** où on en a tiré jusqu'à 1.400.000 tonnes par an. Ces minerais très charbonneux sont grillés sans addition de combustible et donnent un produit à 50-70 %.

France. — On n'y trouve pas des lits de minerais charbonneux comparables à ceux de la Ruhr ou d'Ecosse ; mais les couches de sidérose ont pourtant été signalées dans diverses exploitations houillères et concédées, sans grand profit (dans le *Centre* notamment), de même que la sphérosidérite.

Dans le *Gard*, le gisement de Palmesalade, abandonné depuis 1872, est tout à fait problématique. Il comprend 9 amas interstratifiés d'une épaisseur totale de 14 mètres, où la sidérose s'associe aux minerais sulfurés (galène, blende, cuivre gris...) ; on l'a considéré quelquefois comme d'origine filonienne.

Le *Permien* et le *Trias* marquent une interruption des dépôts ferrugineux correspondant à un régime continental ou lagunaire, dans lequel les remaniements de sels ferreux paraissent avoir été amenés à prendre la forme des argiles bariolées et des grès rouges, sans que la concentration du fer ait formé de vrais minerais.

5. Minerais du Lias. — Dans ce système, les minerais prennent de nouveau un très grand développement.

On en connaît, par exemple, dans l'*Hettangien* de la *Côte-d'Or* et de la *Saône-et-Loire*. Les gisements n'y ont plus guère qu'une importance his-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

torique. A **Thostes** (Côte-d'Or), on a un minerai oolithique associé à une lumachelle et ayant subi un enrichissement superficiel en Fe (70 %). Il a été l'objet de nombreuses exploitations anciennes. A **Mazenay** (Saône-et-Loire), qui fut l'origine de l'industrie du Creusot, on trouve une lentille de minerai ayant 8 kilomètres × 1 kilomètre. Le minerai est à gangue calcaire, d'excellente qualité (25 à 28 % Fe ; 0, 1 de Mn) ; mais il est à peu près épuisé actuellement. Le voisinage du soubassement granitique explique la présence du vanadium.

Dans le *Charmouthien* d'*Angleterre* (**Cleveland**) existent des gisements très importants. La couche principale à 2 m. 50 a 5 mètres d'épaisseur et s'étend sur 750 km². C'est, avec le Cumberland, la plus importante source de minerais de fer en Angleterre. Le meilleur minerai est bleuâtre et consiste en un carbonate impur, généralement oolithique, tenant 40 à 43 % de fer, 9 % d'alumine, 12 % de silice et 1,5 % de phosphore.

Gisements toarciens de Lorraine. — Les gisements de Lorraine ont pris une grande importance. Ils se partagent entre la France et le Luxembourg.

Des minerais ont été exploités très anciennement dans la région ; mais c'étaient des poches de minerai sidérolithique dans des calcaires. On a également exploité les affleurements proprement dits, où la teneur en phosphore était réduite. Mais les minerais en place étaient trop phosphoreux pour avoir motivé une exploitation avant l'application des procédés de déphosphoration.

Le centre le plus ancien se trouve au Sud près de *Nancy* (*Pompey*) ; tout à fait au Nord se rencontrent les centres de *Longwy* (aciéries de Mont-Saint-Martin) et de *Villerupt*. Dans la partie intermédiaire, le bassin de *Briey* a été trouvé de 1882 à 1896 grâce à une campagne de sondages. Son exploitation a été longtemps arrêtée par l'abondance de l'eau ; les difficultés sont aujourd'hui surmontées et de grosses usines se sont outillées pour traiter chacune 2 millions de tonnes.

On peut dire que le manque de débouchés limite seul la production de cette région. La métallurgie, qui achète ces minerais, est, de son côté, arrêtée par le manque de combustibles. La production a été en 1910 :

Meurthe-et-Moselle	11	millions	de tonnes
Alsace-Lorraine.....	14	»	»
Luxembourg	5	»	»

En 1929, avant la crise mondiale, la production française de Lorraine était évaluée à elle seule à plus de 46 millions de tonnes.

Les couches de la région forment une longue ligne de côtes, appelée *Côtes-de-Moselle*, allant de Thionville à Nancy. Ces côtes sont constituées par les argiles du *Toarcien* surmontées par les escarpements de calcaire bajocien. C'est presque au contact des deux terrains qu'apparaît le minerai, sous une épaisseur de 30 mètres de marnes micacées. Les couches plongent vers le centre du bassin parisien avec une pente très faible (1 à 2 %) ; les minerais s'enfoncent donc progressivement vers l'Ouest et, au delà d'une certaine limite occidentale, ils sont trop profonds pour permettre une exploitation rémunératrice. L'inclinaison générale des terrains détermine, dans les parties basses du gisement, la formation de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

nappes aquifères sous pression ayant entraîné une certaine gêne au début de la mise en valeur. Les couches ferrifères affleurent à la base de la Côte de Moselle ou dans les vallées ; sur le plateau, on les atteint en profondeur par sondages ; au point de vue de l'exploitation, elles sont pratiquement horizontales.

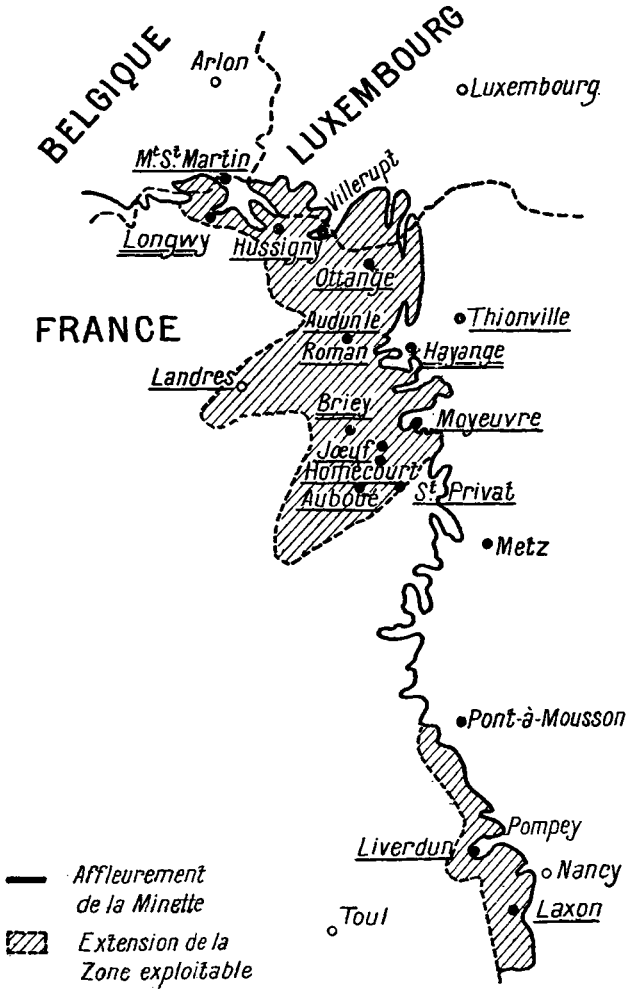


Fig. 100. — Carte des gisements de fer lorrains.

Le gisement se compose d'une *série de lentilles* allongées qui chevauchent les unes sur les autres, intercalées entre des marnes vertes gréseuses et pyriteuses au mur et des marnes micacées au toit. Chacune a une extension limitée. Les principales lentilles portent des noms locaux, d'après leur coloration : rouge (étage supérieur), grise

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

(moyen), noire (inférieur), quelquefois jaune et verte. Ces noms locaux ont été étendus à tout le bassin sans qu'ils correspondent en beaucoup de points à la couleur réelle de la couche. D'ailleurs, cette assimilation est purement hypothétique, l'âge des diverses lentilles étant un peu différent.

La *puissance* totale de la formation ferrifère, du toit au mur, varie de 20 à 50 mètres. Entre les bancs réputés minerais dont la teneur dépasse 30 %, s'intercalent souvent, outre les couches stériles, des calcaires ferrugineux (15 à 20 % de fer). Le niveau utilisable a des épaisseurs variables: 5 à 6 mètres dans la région de Nancy (d'où la nécessité d'y faire des boisages importants) ; 5 à 7 mètres, mais plus généralement 2 mètres à 3 m. 50, dans la région de Briey. Comme limite absolue d'exploitation, on admet une épaisseur d'un mètre pour les minerais calcaires et riches ; 1 m. 75 pour les minerais siliceux et pauvres.

Les couches de minerai oolithique sont rarement homogènes sur toute leur hauteur et se composent d'une série de bancs de qualités différentes, avec ou sans transition de l'un à l'autre. Le minerai lui-même contient des veinules irrégulières d'argile ou de calcaire ferrugineux. Par endroits, il est très riche en fossiles (coquilles et bois fossiles), agglomérés souvent en lumachelles ; ces fossiles donnent à la formation originelle un caractère littoral très net. La proportion du phosphore est en relation étroite avec l'abondance des restes organiques.

La structure du minerai, ou *minette*, est *oolithique*. Chaque oolithe est formée de couches concentriques de limonite plus ou moins argileuse ; parfois elle renferme, en outre, vers le centre, un résidu de chlorite et même de sidérose. La surface en est lisse, brillante et de couleur brune, avec nuances variant du jaune au rouge. L'analyse des oolithes isolées donne une teneur en fer de 53 %. Le ciment qui réunit les oolithes est un mélange, en proportions variables, d'argile, de calcaire, de silicates de fer, quelquefois de sidérose ; il est tantôt blanc, tantôt gris noirâtre, tantôt vert, tantôt brun ; aux affleurements, il est peroxydé et jaunâtre. La teneur en fer du ciment ne dépasse pas 35 %.

Dans l'ensemble, le minerai lorrain a une *teneur* qui varie entre 30 et 40 %. Au-dessous de 30 %, il n'est utilisable que jusqu'à 20 % quand sa gangue est calcaire ; il sert alors de castine (minerai luxembourgeois). Mais il existe aussi des minerais fortement siliceux qui ont été longtemps inexploités et qui ne sont utilisés qu'en mélange avec des castines calcaires (tels sont les minerais de la région de Thionville) : ces minerais siliceux constituent d'énormes réserves. Le *phosphore* varie entre 0,2 et 1 % ; il y a un rapport assez constant (env. 2/100) entre la teneur en phosphore et celle du fer. Les ventes se font d'après la qualité moyenne du groupe sans faire des subdivisions comme en Suède. La proportion de *soufre* ne dépasse guère quelques dix-millièmes.

En général, à la base du gisement, dans la couche verte, existe un peu de pyrite qui rend cette couche inexploitable jusqu'à présent. Voici l'analyse des minerais des environs de Nancy.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

	Bonne qualité	Minerai moyen
Fer	50	42
Alumine	7	6
Chaux	14	9
Silice	5 à 6	6
Perte au feu	20	»
Phosphore	»	0,1 à 0,15

La *pénétration ferrugineuse* principale dans le calcaire oolithique originel semble s'être effectuée presque immédiatement après le dépôt. Une étude approfondie de la nature du minerai indique que celui-ci est passé successivement par les stades suivants :

1° Oolithes calcaires ;

2° Pénétration du fer par métasomatose, à l'état de *sidérose* ;

3° Transformation en *chlorite* ;

4° Peroxydation du fer (stade : *limonite*).

Il s'est produit ensuite des remises en mouvement, des concentrations locales, des altérations ocreuses aux affleurements.

Une théorie, peu vraisemblable, attribue au fer une origine filonienne. Elle s'appuie sur la présence de *failles* N.-E. /S.-W. (peut-être des accidents posthumes des plissements hercyniens), ayant 10 à 25 mètres de rejet et découpant le terrain en compartiments. On croyait que les zones de plus forte concentration du fer étaient en relation avec ces failles, dites nourricières, par lesquelles le fer serait arrivé après coup. Mais la coïncidence, signalée dans quelques cas particuliers (ce qui n'est pas étonnant, étant donné le grand nombre de failles) est loin de se vérifier d'une façon générale. Les coïncidences locales s'expliquent plutôt par des remises en mouvement ultérieures, dues à la circulation des eaux superficielles par les fractures.

6. Minerais du Jurassique moyen. — Ils sont peu importants et ne sont plus guère exploités.

Bajocien. — Dans le Bajocien du *Jura* et de la *Nièvre*, on trouve des oolithes ferrugineuses très fossilifères. On les connaît aussi dans l'*Ardèche*, où le minerai de **Privas** est parfois agatisé, c'est-à-dire qu'il a été silicifié postérieurement à sa formation [le phénomène est comparable à celui qui a produit les jaspilites du Lac Supérieur]. Le même niveau existe encore en *Wurtemberg* et en *Haute-Silésie*.

Callovien et *Oxfordien.* — Un peu au-dessus, dans le Callovien, existent quelques gisements. Ainsi celui de **La Voulte** (*Ardèche*) est formé de bancs ferrugineux, séparés par des marnes schisteuses ; le banc du mur est constitué d'un minerai rouge foncé oolithique ; le banc moyen, le plus riche et le plus épais (7 m. 50), renferme des lits de minerai agatisé ; le banc du toit contient un minerai lithoïde carbonaté. Le gisement de **Chamoson** (Valais, Suisse) n'a pas d'importance industrielle ; mais il a donné son nom à la chamosite, silicate de fer et d'alumine. L'Oxfordien

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

du *Gard*, des *Ardennes*, de la *Haute-Marne* possède des niveaux ferrugineux qui ne sont plus exploités.

7. Minerais du Crétacé. — Au-dessus du Jurassique moyen, les niveaux ferrifères disparaissent ou deviennent insignifiants. On n'en connaît pour ainsi dire pas, du type marin, dans le Jurassique supérieur, le Crétacé, l'Eocène et le Miocène.

Tout au plus, peut-on citer, dans le Crétacé, les minerais détritiques du flanc nord du *Harz*, formés aux dépens de terrains ferrugineux préexistants, et les ocres jaunes cénomaniennes de *Bourgogne* qui semblent correspondre à une altération ancienne de strates carbonatées et qui donnent par calcination une ocre rouge employée pour la peinture (minium de fer).

8. Minerais tertiaires. — A part quelques minerais oolithiques éocènes exploités en *Bavière*, on ne retrouve plus de minerais que dans le *Pliocène*, à **Kertch** (*Crimée*). Il y a là un cube de plusieurs centaines de millions de tonnes ; mais les résultats de l'exploitation ont été médiocres. On a de véritables lumachelles de coquillages (Cardium), avec une forte proportion de phosphate à l'état de phosphure de fer, montrant bien la relation qui existe entre le nombre des organismes et la teneur en phosphore et même en fer, tout au moins dans l'ensemble. Dans ce gisement, la série géologique commence par le Sarmatien et continue par le Pontien ; les couches ferrugineuses sont au-dessus. Leur épaisseur peut atteindre de 4 à 6 mètres ; on y trouve des pisolithes, analogues à ceux du Berry ; les grains ont de 1 millimètre à 10 millimètres. La composition des minerais, très difficiles à enrichir, est de 30 à 40 % de Fe avec 1,5 de phosphore, la teneur en silice oscille entre 15 et 20 %. Ces minerais sont fragiles, argileux et sableux ; on doit les débourber et on obtient alors des minerais en poussière, toujours soumis à une certaine dépréciation par suite des inconvénients qu'ils présentent à la fonte (collage).

9. Dépôts des mers actuelles. — On n'y rencontre aucun dépôt qui soit comparable aux formations des minerais de fer sédimentaires. Cependant on y trouve des produits glauconieux se développant un peu au delà de la zone littorale à une profondeur ne dépassant pas 1.800 mètres. On s'est demandé si cette glauconie se serait pas l'origine des minerais de fer ; cela ne paraît pas démontré. La glauconie semble due à l'action de l'eau de mer sur les sédiments terrigènes (argiles, silicates).

Ces nodules glauconieux passent vers le large à des nodules manganésifères noyés dans l'argile rouge des grands fonds et ayant jusqu'à 5 et 10 centimètres ; il s'y mêle un peu de cobalt qui se concentre toujours en même temps que le manganèse.

IX. — Sédiments des lacs et des marais

Ils n'ont pas d'importance pratique ; on les a rapprochés parfois des dépôts ferrugineux sédimentaires d'origine marine, avec lesquels ils n'ont aucune analogie.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

On connaît, dans les terrains géologiques, des dépôts ferrugineux d'origine lacustre. Il en existe dans le *Carbonifère* (nodules de sidérose dans les bassins houillers de l'*Allier*, de la *Nièvre*, etc.). Dans le *Crétacé* (Néocomien du *Pays de Bray*), il y a des minerais de même origine, carbonatés en profondeur, oxydés en surface. Dans la *Haute-Marne*, le minerai barrémien de *Vassy* est également d'origine lacustre. Ces minerais ont eu autrefois une certaine importance industrielle.

Actuellement, des minerais de fer se produisent dans des marais tourbeux (lacs de *Scandinavie, Finlande, Jutland, Lusace, Silésie, Pologne*, etc.), sous une nappe d'eau peu épaisse (1 mètre) et sur un fond sableux. Les minerais peuvent se former sur 0 m. 50 d'épaisseur et se renouveler tous les trente ans. Ils sont dus à la fixation des sels de fer de tout le bassin, dissous par les eaux et amenés dans la cuvette lacustre. Cette fixation se fait par l'intermédiaire des ferro-bactéries ; il se produit une boue ocreuse, grise ou verdâtre, qui s'amasse dans le fond et peut se transformer en oolithes. La proportion de phosphore est toujours notable. Elle provient des plantes associées, notamment des algues.

X. — Gisements d'altération continentale

A propos de tous les gisements, on a vu qu'ils ont subi des altérations au voisinage de la surface.

Mais, à côté de ces phénomènes locaux, il y a des gisements qui paraissent s'être constitués, sans qu'il ait existé de gisements antérieurs, par simple remaniement des terrains superficiels, qui, comme on le sait, contiennent toujours une certaine proportion de fer. Ces phénomènes se sont produits dans les périodes d'altération continentale, pendant lesquelles les sels de fer des roches (en moyenne 5 %) ont été remis en mouvement et concentrés.

Ces sortes de gisements ne sont conservés qu'assez exceptionnellement parce qu'ils ont été généralement dispersés après leur formation. On les trouve surtout dans le Tertiaire (phase *sidérolithique*). Cependant ceux des époques antérieures n'ont pas tous disparu ; on en connaît quelques-uns.

Dans le *Sinien* (Ordovicien supérieur) de **Chine**, on a reconnu, entre l'Ordovicien et le Carbonifère, des intercalations de poches avec oolithes ferrugineuses analogues à celles du Berry. Ces formations correspondent à une lacune dans la stratigraphie, donc à une période d'émersion.

On retrouve des phénomènes du même genre dans le **Jura franconien** (*Bavière*). Il y a, vers 400-600 mètres d'altitude, un grand plateau de calcaires et de dolomies jurassiques, recouvert par du Crétacé et du Tertiaire. On s'est aperçu que le Jurassique supérieur a été érodé avant le dépôt du Crétacé et présente un aspect accidenté, fissuré, ruiniforme, analogue à celui du Karst et de Montpellier-le-Vieux. Les poches et excavations qui se sont formées à la partie supérieure du Jurassique ont été remplies de minerais de fer, résultant d'une altération continentale analogue à celle qui s'est produite dans le Berry. Ces minerais occupent plus de 700 kilomètres carrés de superficie ; on y a fait plus de 400 sondages ; on estime

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

leur cubage à 1.500 millions de tonnes. Cependant l'exploitation n'a pas commencé avec une grande activité. Ces minerais sont, en effet, à faible teneur, très siliceux, très alumineux et probablement très irréguliers.

Berry. — Les minerais du Berry peuvent être considérés comme le type de ces formations continentales. Ils se sont produits pendant la période d'émersion qui se place à la fin du Secondaire et au début du Tertiaire.

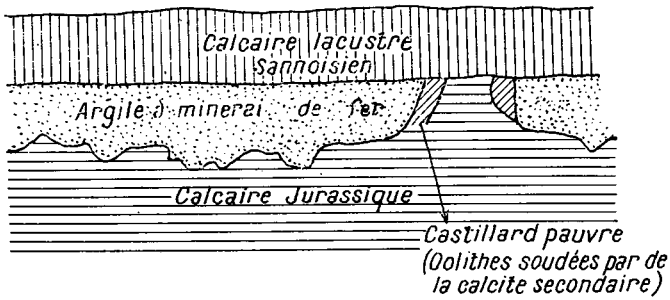


Fig. 101. — Position stratigraphique des argiles à minerai de fer du Berry.

Les calcaires jurassiques sont criblés, à leur partie supérieure, de cavités innombrables, parfois très profondes, irrégulières, présentant quelquefois un aspect filonien ; mais il s'agit, en réalité, de diaclases dans les calcaires, agrandies par les eaux et remplies ultérieurement par des produits de dissolution du calcaire : argile rouge à grains de fer hydroxydé.

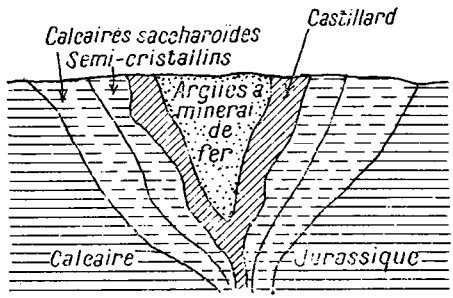


Fig. 102. — Coupe d'une poche d'argile à minerai de fer dans le calcaire jurassique.

Ces minerais ont été recouverts par des calcaires sannoisiens (lacustres). Ils ont une structure nettement pisolithique et forment de gros grains agglomérés ou non. Ils contiennent 58 % d'alumine, 10 % de silice, un peu de phosphore. Ils forment une transition aux bauxites. Le phénomène d'altération est comparable à celui qui a donné les phosphorites du Quercy.

Sans importance aujourd'hui, ces minerais, alumineux et difficiles à fondre, qui nécessitent un débourbage, ont alimenté les hauts-fourneaux au bois de la région de Montluçon, jusque vers 1890.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

On retrouve des dépôts analogues en *Meurthe-et-Moselle, Loire-Inférieure, Anjou, Bourgogne, Silésie, Espagne, Russie,* etc.

Latérites. — Le mode de formation des minerais en grains doit être en rapport avec celui des latérites actuelles, où s'opèrent, de la même façon, des concentrations de fer, alumine, manganèse, chrome. La teneur en fer est souvent assez notable pour en faire de véritables minerais, généralement très siliceux et très alumineux et qui passent progressivement à des bauxites.

Ces minerais latéritiques existent à *Cuba,* au-dessus de serpentines. Ils y prennent parfois l'aspect de grains rougeâtres soudés ensemble. Leur teneur en fer est de 45 % environ ; 14 % d'alumine ; 1,5 % de nickel et de cobalt ; 2 % de chrome. Minerais très difficilement fusibles.

On trouve des minerais analogues en *Guinée,* à *Madagascar,* etc.

Alios. — Enfin, on peut rattacher aux cas de concentrations continentales les formations du type *alios.* Dans les tourbières, les eaux ascendantes, amenées par des sables aquifères, peuvent venir déposer, au milieu de la tourbe, du carbonate de fer amorphe, bientôt transformé en limonite.

L'alios des *Landes* est un sable quartzeux agglutiné par de la limonite et des matières organiques, qui se produit à 1 mètre ou 2 de profondeur par évaporation estivale de nappes souterraines ayant puisé du fer dans les terrains traversés.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXII

MANGANÈSE

La manganèse se rapproche du fer par ses propriétés, ses usages, ses conditions géologiques de gisement.

1. Usages. — Le grand usage du manganèse, dont le développement rapide a déterminé l'essor parallèle de l'extraction de ce métal, est la **métallurgie du fer**. 90 % des minerais produits passent à cette application. L'emploi du manganèse en sidérurgie vient de la facilité avec laquelle il s'allie au fer. Les *ferro-manganèses* (fontes renfermant plus de 25 % Mn) servent dans la fabrication de l'acier pour obtenir l'épuration en soufre et en phosphore : le manganèse donne, en effet, avec les impuretés, des composés qui passent dans la scorie. Le *spiegel* (fonte tenant de 2 à 25 % Mn) est utilisé dans le même but. On fabrique aussi des *silico-manganèses*, des *silico-spiegel*; en ajoutant de la silice aux produits précédents.

Le manganèse entre aussi dans la composition de certains **alliages.** Avec le cuivre, il donne un *bronze manganésé.* résistant à de fortes tensions, dont on fait les coussinets et les boîtes à feu des locomotives. Avec le cuivre (80 %) et l'étain (10 %), il permet d'obtenir des alliages très durs, mais très ductiles, très malléables, se courbant sans se fissurer, donc faciles à travailler. Il en est de même avec le cuivre (85 %), l'étain (6 %), le zinc (3 %), etc.

Parmi les autres applications du manganèse qui sont en général plus anciennes que les précédentes, on peut citer : la *préparation du chlore* et de ses composés, qui en consomme beaucoup moins depuis la découverte des procédés de régénération, la *préparation de l'oxygène*, *l'industrie de la verrerie* (il décolore les verres colorés en jaune par le fer), les *industries chimiques*, etc.

2. Commerce. — Le commerce du manganèse a beaucoup varié. On a d'abord exploité, pour la fabrication du chlore et pour la verrerie, une série de petits gisements en Angleterre (Devonshire, Cornwall), dans le Harz et le Piémont.

Vers 1840, on découvrit les gîtes du Nassau (Allemagne). Les prix se maintinrent cependant assez élevés. On les calculait à partir d'une teneur-étalon de 70 %. Le minerai à 70 % valait alors 200 francs la tonne.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Le prix a baissé ensuite jusqu'à 65 francs la tonne en 1865, par suite de la mise en valeur des mines de Huelva (Espagne).

Celles-ci se sont épuisées ; en même temps, la métallurgie a commencé à employer le manganèse ; il s'en est suivi une hausse assez forte.

L'industrie a été enfin complètement transformée par la mise en valeur des minerais russes du Caucase et de Nikopol. Ceux-ci ont eu une grosse production, interrompue au moment de la révolution. Ultérieurement, on a développé l'Inde anglaise, la Gold Coast et le Brésil.

Un bon minerai moyen à 50 % valait environ 70 francs la tonne avant la guerre. En 1932, la pyrolusite est vendue environ 1 franc-or par unité et par tonne ; le silico-manganèse à 20-25 % de silicium et 50-55 % de manganèse, 380 fr.-or la tonne; le ferro-manganèse à 76-80 % de manganèse, 200 francs-or.

3. Statistique. — L'établissement de la statistique du manganèse présente de grosses difficultés : en effet, un grand nombre de minerais à faible teneur sont exploités pour le fer. Aussi n'envisagerons-nous ici que les minerais à haute teneur renfermant plus de 35 % de manganèse.

La production mondiale de ces minerais s'est élevée, en ces dernières années, entre 3.000.000 et 3.500.000 tonnes.

En 1910	1.900.000	tonnes
En 1913	2.300.000	»
En 1922	1.200.000	»
En 1924	2.300.000	»
En 1927 et 1928	3.250.000	»
En 1929	3.500.000	»

Elle a fléchi dans les années de guerre et aussitôt après, puis repris comme pour la plupart des métaux.

Elle se répartit ainsi entre les différents pays en 1929 (dans l'ordre d'importance) :

Russie et Géorgie	1.200.000 tonnes (1.250.000 en 1913 ; 90.000 en 1922 ; 1.560.000 en 1930).
Inde anglaise	1.000.000 tonnes (830.000 en 1913 ; 480.000 en 1922).
Côte de l'Or anglaise ..	415.000 tonnes (4.000 tonnes en 1916 ; 350.000 en 1926 ; 420.000 en 1930).
Brésil	300.000 tonnes (550.000 en 1916 ; 160.000 en 1924).

Puis nous arrivons à des productions beaucoup moins importantes :

Egypte	190.000 tonnes (77.000 en 1920).
Tchécoslovaquie	95.000 tonnes (50.000 en 1920 ; 23.500 en 1922).
Etats-Unis	60.000 tonnes (Production très changeante : 4.000 en 1913 ; 310.000 en 1918 ; 13.000 en 1922 ; 100.000 en 1925).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Enfin viennent des productions accessoires :

Chine	43.000 tonnes.
Roumanie	35.000 tonnes.
Indes Néerlandaises	21.000 tonnes.
Hongrie	19.000 tonnes.
Japon	18.000 tonnes (57.000 en 1918).
Espagne	18.000 tonnes (78.000 en 1918).
Suède	15.000 tonnes.
Italie	10.000 tonnes (36.000 en 1920).
Afrique du Sud	9.000 tonnes (150.000 en 1930).

La *France* a une toute petite production : 2.600 tonnes (11.000 tonnes en 1916). Elle a très peu de mines de manganèse exploitées : Las Ambollas dans les Pyrénées-Orientales, Dunet dans l'Indre, etc. De même, l'*Afrique du Nord française* (6.000 tonnes en 1928) ; *Porto-Rico* (2.000 tonnes) ; l'*Angleterre* (200 tonnes en 1928) ; la *Grèce* (1.000 tonnes en 1928).

Cuba, qui a eu une forte production (180.000 tonnes en 1918), ne produit presque plus rien (1.000 tonnes).

L'*Allemagne*, qui a produit plus de 80.000 tonnes en 1910 n'a plus qu'une production négligeable (500 tonnes).

4. Minerais. — Les minerais de manganèse sont comparables à ceux du fer en ce qu'ils sont oxydés. Le sulfure de manganèse, très instable, n'existe pour ainsi dire pas dans la nature ; il représente peut-être la forme originelle des autres minerais qui sont les oxydes, les silicates et les carbonates.

Pendant longtemps, on n'a exploité que les **oxydes** : *pyrolusite* (MnO^2) ; *psilomélane* (bioxyde barytifère) ; quelquefois, mais plus rarement, *haussmannite* (Mn^3O^4), *braunite* (Mn^2O^3), *acerdèse* ($Mn^2O^3H^2O$).

Actuellement, au fur et à mesure que l'on tend à descendre en profondeur, les **silicates** (*rhodonite*) et les **carbonates** (*dialogite*) jouent un rôle plus important: par exemple dans l'Inde, à Huelva (Espagne) et dans les gîtes des Pyrénées.

5. Conditions de gisement. — Les gisements de manganèse présentent le caractère général d'être *très superficiels*. Le manganèse est le métal qui se concentre le plus facilement à la surface (dendrites sur des cailloux, dans les fentes des calcaires ; nodules dans les terrains argileux superficiels) ; le phénomène est le même que pour le baryum, le silicium, le cobalt. Il y a souvent parallélisme entre les accroissements de la teneur de ces divers métaux : la psilomélane associe le manganèse au baryum, l'asbolane au cobalt (par exemple, 31 à 40 % de Mn, 19 à 32 % de Co).

Tous les gisements sont *très précaires* et s'évanouissent en profondeur où l'on ne trouve que des minerais de fer ou même des roches contenant des proportions minimes (1/2 %) de manganèse. Ainsi à Huelva, où se rencontre du manganèse sur les affleurements filoniens, il disparaît vers 25 mètres. Il en est de même au Laurion, etc.

6. Principaux gisements. — On peut distinguer plusieurs types de gisements de manganèse :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

I. GÎTES DE SÉGRÉGATION OU DE CONTACT. — Le manganèse s'est souvent concentré dans des magnétites de ségrégation, en même temps que le fer, le titane et le chrome, mais en plus faibles proportions (*Routivara*).

A **New-Jersey**, le gisement rappelle les venues filoniennes de contact du type Banat, avec substitution d'oxyde de manganèse au calcaire. Il est intercalé dans un calcaire cambrien très manganésifère, reposant sur une roche cristalline. Il a épousé les plissements intérieurs du calcaire et forme une couche sensiblement parallèle au soubassement cristallin avec lequel il semble être en relation. De nombreux filons de pegmatite, traversant le calcaire, y ont développé par métamorphisme des gangues silicatées.

En partant du haut, on trouve, dans le calcaire, de grandes quantités de dialogite qui noircit à l'air ; puis le gisement proprement dit renferme de la *franklinite* (spinelle de fer, zinc et manganèse), zincite, willémite, rhodonite, blende, magnétite. Il contient environ 12 % de manganèse.

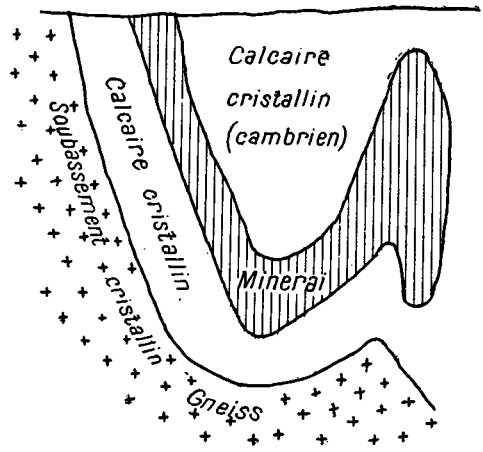


Fig. 103. — Coupe verticale du gisement de New-Jersey.

II.) OXYDES DE MANGANÈSE DANS LES PARTIES HAUTES DE FILONS MÉTALLIFÈRES. — Il est fréquent de voir les oxydes de manganèse noirs se développer sur les affleurements de filons métallifères.

Au **Laurion** (*Grèce*), on a pu exploiter des minerais oxydés de manganèse aux affleurements. Dans le calcaire, on trouve des zones de carbonate de manganèse et de fer ; ce carbonate, par altération, noircit à l'air en donnant de la pyrolusite en couches parfois épaisses ou de la psilomélane remplissant des fractures transversales du calcaire. Ainsi on a découvert certaine galerie de grotte horizontale de plus de 150 mètres de long et contenant un précipité secondaire de boue à 32 % de manganèse à l'état d'oxyde.

A **Milos** (*Archipel grec*), il existe de curieux gisements d'argiles, bioxydes de manganèse et barytines argentifères, qui se sont développés sur les affleurements de venues filoniennes à sulfures complexes, recoupant des trachytes.

A **l'île d'Elbe**, on a exploité des limonites manganésifères à 6–10 % de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

manganèse avec barytine. Elles ont rapidement disparu en profondeur.

Des gisements semblables existent en *Toscane*, en *Saxe*, dans l'*Oural*, au *Mexique* (association avec l'argent natif et le chlorure d'argent), au *Congo français* (Mindouli), à *Madagascar*, etc.

Gisement de Romanèche (*Saône-et-Loire*). — Ce gisement constitue l'un des exemples les plus nets de concentration du manganèse à la partie haute d'un filon. Découvert en 1750 et concédé en 1823, il est presque abandonné aujourd'hui. Il comprend, en réalité, deux types distincts : *a*) des filons, qui jalonnent le contact par faille entre le plateau granitique à l'Ouest et les calcaires liasiques à l'Est et qui s'éparpillent en stockwerk dans le granite ; *b*) un amas de remaniement, formant filon-couche de contact entre les grès rhétiens et le calcaire à gryphées et disloqué par de petites failles.

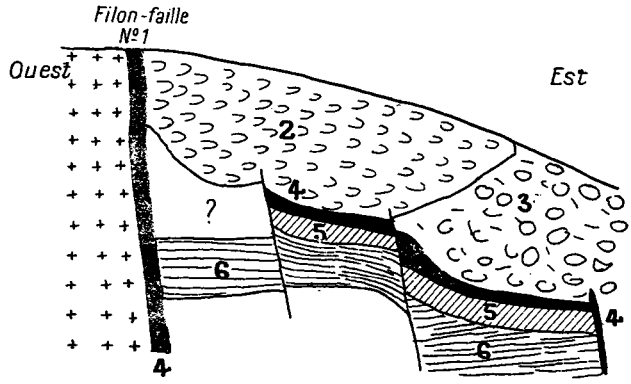


Fig. 104. — Coupe du gisement de Romanèche.

1. Granite.
2. Remaniement quaternaire.
3. Calcaire à gryphées disloqué.
4. Minerais.
5. Grès rhétien.
6. Marnes irisées.

L'exploitation a surtout porté sur les filons, qui représentent eux-mêmes dans leur partie haute une forme altérée secondaire. Des géodes vides, des concrétions stalactitiformes font penser à une circulation d'eaux descendantes ; le granite au contact est très kaolinisé. La minéralisation consiste en psilomélane (aspect mamelonné) ou romanèchéite, quartz, fluorine, barytine, avec faible teneur en arsenic ; le manganèse a disparu vers 80 mètres de profondeur. Il est difficile de dire quelle est la forme profonde de ces filons : il s'agit peut-être de filons sulfurés complexes avec mispickels.

On peut comparer à ce gisement un filon de l'*Allier*, aux **Gouttes-Pommiers**, où existe, en surface, un bel affleurement de manganèse, avec ocres et opale au milieu d'un calcaire dévonien. C'est une grande poche se terminant par un filon. On a voulu par des travaux le recouper à 25 mètres de profondeur. On n'a rien trouvé, si ce n'est quelques veines pyriteuses.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

III. Silicate et carbonate de manganèse des filons argentifères. — On a souvent reconnu l'abondance du silicate et du carbonate de manganèse (roses) dans des filons métallifères, spécialement dans des filons argentifères. Ces minéraux semblent résulter d'une concentration secondaire, qui s'est réalisée, en même temps que la concentration de l'argent, dans les parties superficielles des filons. Les exemples en sont nombreux au *Montana*, au *Colorado*, en *Nouvelle-Zélande*, en *Tchécoslovaquie* (*Schemnitz*), au *Japon*.

IV. Amas de substitution dans les calcaires. — Le cas est assez analogue à celui du fer et le carbonate de manganèse s'y présente dans les mêmes conditions que le carbonate de fer.

Ce cas est réalisé, par exemple à **Las Cabessès** (*Ariège*). Les calcaires griottes du Dévonien supérieur sont recoupés par des failles et des diaclases, grâce auxquelles les eaux, chargées de manganèse, ont imprégné les calcaires, là où ils étaient poreux et tendres, laissant au milieu un noyau calcaire dur inaltéré. Le schéma du gisement ressemble par suite à celui d'un polypier. L'origine première semble être filonienne. Aux affleurements, la dialogite passe à la pyrolusite. Les colorations rouges et violacées de la griotte non imprégnée sont dues à une faible teneur en sels de manganèse. Enfin ajoutons que le gisement se trouve en contact vers le haut avec les couches de phosphates noirs dévoniens des Pyrénées.

V. Gisements stratiformes. — Ils se trouvent dans des couches d'âges très divers. Leur origine est fort discutable. On peut se demander s'ils sont contemporains des terrains encaissants, c'est-à-dire s'ils sont réellement sédimentaires, ou s'ils proviennent de remises en mouvement, de pénétrations postérieures à la formation de ces terrains.

Si, dans quelques cas, on a pu les assimiler, à cause de la présence de Radiolaires, aux formations manganésifères actuelles, qui ont lieu dans de grandes profondeurs marines, la plupart des gisements stratiformes semblent dus à des remises en mouvement postérieures, le manganèse pouvant être d'origine profonde ou superficielle.

Nous allons étudier les principaux gîtes de ce type dans l'ordre stratigraphique des terrains encaissants :

α) Lentilles intercalées dans des terrains cristallophylliens

On les rencontre surtout dans les deux grandes plates-formes des Indes et du Brésil.

Indes. — Les gisements indous ont pris une place importante dans la production du manganèse ; ils se trouvent dans la présidence de Madras et les Provinces-Centrales. Dans les terrains métamorphiques de ces régions, sont intercalées des lentilles interstratifiées de roches manganésifères, qui contiennent, avant tout, en association avec du quartz, de la *braunite* (oxyde incomplet de manganèse) et un peu de pyrolusite ou de psilomélane. Ces oxydes paraissent dus à une altération fort ancienne de minéraux silicatés : grenat (spessartine), rhodonite. Le métamorphisme igné de profondeur se serait exercé sur d'anciens sédiments contenant des couches déjà manganésifères ; il aurait permis la concentration du manganèse et la production de silicates, ultérieurement peroxydés quand ils se sont

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

trouvés ramenés au voisinage du jour. Le développement du sesquioxyde, et non du bioxyde, et des silicates est en faveur d'une intervention ignée.

Les minerais tiennent, en moyenne, 53 % de Mn et sont généralement très purs. Toutefois, dans certains cas, ils renferment 1 à 3 ‰ de phosphore.

En outre, la latérite de l'Inde, produite par l'altération sur place des trapps, contient souvent des concentrations manganésifères (braunite, psilomélane).

Brésil. — Les principaux gisements se rencontrent dans la *Sierra do Itacolumi* (*Minas Geraes*). Ils sont encaissés, sous forme de lentilles ayant 2 à 3 kilomètres de long, dans des micaschistes et calcaires précambriens. Ils sont associés aux itabirites, quartzites ferrugineux riches en oligiste. Il faut probablement attribuer les oxydes de manganèse à la transformation de couches ou filons-couches, qui ont dû autrefois renfermer des oxydes de fer un peu manganésifères et peut-être des sulfures complexes.

La mine la plus importante (*Morro da Mina*) présente une exploitation sur 3 kilomètres de long. Le minerai à 50 % tient peu de silice (1 à 2 %) et presque pas de phosphore (0,06 à 0,08 %).

Saint-Marcel (*Piémont*). — On a exploité dans le Piémont (*Val d'Aoste*) des gisements manganésifères sans grande importance industrielle. En particulier, à Saint-Marcel, le manganèse forme un grand amas interstratifié dans des couches de gneiss peu inclinées ; le minerai consiste en oxydes (braunite, hausmannite, pyrolusite) bien cristallisés et accompagnés de carbonate rouge et de grenat (spessartine). Au contact, tous les minéraux du gneiss ont été pénétrés de manganèse, de manière à donner des minéraux particuliers.

3) Lits manganésifères primaires

Hautes-Pyrénées. — On connaît, dans les schistes dévoniens des Hautes-Pyrénées, quelques bancs, rigoureusement interstratifiés, d'une roche surtout quartzeuse chargée de rhodonite. Au milieu de ce silicate, les oxydes de manganèse, produits par l'altération superficielle, remplissent des poches formant des taches noires sur le fond rose de la rhodonite. Le gisement aurait passé par le stade dialogite, qui aurait subi ensuite une forte silicification, comparable à celle qu'on observe dans les gisements de fer du Lac Supérieur.

Oural. — Le Dévonien de cette région renferme des couches interstratifiées de jaspes manganésifères, qui représenteraient des sédiments de mer très profonde (vases à radiolaires).

Espagne (*Province d'Huelva*). — Dans la région d'Huelva, le manganèse forme des lentilles intercalées en concordance approximative dans des schistes carbonifères (Culm), souvent le long de diabases effusives. Il est probablement en relation avec les amas pyriteux et semble s'être concentré au voisinage de la surface par remise en mouvement. En surface il est représenté par des oxydes, associés à des jaspes et à des oxydes de fer ; en profondeur, on trouve un mélange de carbonate et de silicate de manganèse avec grenat manganésifère.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

γ) Lits manganésifères secondaires et tertiaires

Caucase (Tchiatoura). — Les couches de Tchiatoura, sur la *Kvirila*, dans le gouvernement de Koutaïs, ont une très grande importance industrielle. Elles couvrent une étendue de plus de 60 km², à la partie supérieure de l'Eocène supérieur ou même dans l'Oligocène. Ces terrains tertiaires, faiblement inclinés, reposent sur la craie turonienne. La couche manganésifère est très continue, avec une épaisseur de 1 m. 50 à 2 mètres ; elle disparaît dans tous les sens par amincissement. Elle est formée de petits bancs de pyrolusite séparés par des lits de sable marneux et s'intercale dans une série gréso-calcaire. Le minerai, avec dents de poissons et fragments de coquilles, a parfois une structure oolithique ; il tient 55 % de Mn, un peu de baryum et un peu de phosphore (0,05 à 0,15 %). On a tous les caractères d'une formation sédimentaire littorale, assez incompatible avec les conditions habituelles de grand fond des dépôts manganésifères actuels. L'origine du gisement est donc assez mystérieuse.

Nikopol (*Russie méridionale*). — Ce gîte, très important au point de vue industriel, se trouve dans le gouvernement d'Iekatérinoslav. Il est comparable aux précédents. La pyrolusite forme une couche de 1 m. 50 à 2 m. 50 d'épaisseur dans le Sarmatien ; elle se présente en nodules irréguliers, parfois géodiques, plus ou moins gros, plus ou moins soudés entre eux et disséminés dans un sable teinté en noir par le manganèse. Les coquilles, les dents de poissons, les débris de bois y sont abondants.

Comme à Tchiatoura, les conditions de dépôts sont très probablement littorales, avec des changements continuels dans les lignes de rivages. Les sédiments manganésifères ont pu se déposer dans des baies peu profondes, non loin de dômes émergés ou de hauts fonds de roches cristallines : le manganèse aurait eu pour origine première les roches cristallines ; il se serait concentré dans l'eau de mer et se serait précipité sous des influences mal connues.

δ) dépôts actuels de manganèse

A l'époque actuelle, il se forme des minerais de manganèse de deux manières : *a*) par concentration au milieu des argiles dans les grandes profondeurs des mers (1.800 à 3.000 mètres) et aussi, beaucoup plus rarement, au voisinage de certaines côtes (Ecosse) ; *b*) dans les lacs et marais.

VI. Gisements d'altération continentale. — Il y a des cas où des concentrations continentales et superficielles de manganèse s'opèrent, sans qu'il existe en profondeur de minerais manganésifères, simplement aux dépens de terrains encaissants ayant une faible teneur en manganèse.

Nous avons déjà signalé les concentrations qui se produisent dans les latérites des *Indes*, provenant de l'altération sur place des trapps.

Hesse et Nassau. — 1° Dans ces deux régions, les terrains dévoniens (grès, schistes, calcaires dolomitiques) sont recouverts par des dépôts d'argile assez épais (parfois 15 mètres) résultant d'une longue altération continentale et pénétrant dans les poches plus ou moins irrégulières du calcaire.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

C'est dans ces poches que l'on trouve du phosphate, du manganèse plus ou moins barytique, associé à de l'hématite. Le terrain encaissant peut

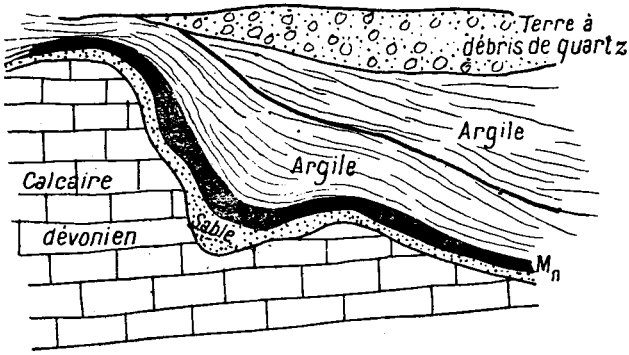


Fig. 105. — Coupe théorique d'une mine de manganèse à Niedertiefenbach.

contenir 0,6 et jusqu'à 3 % de manganèse. Le manganèse (pyrolusite, psilomélane, wad) forme des nodules et des lits plus ou moins continus à la base des argiles (0 m.15 à 0 m. 30 d'épaisseur). Il pu aussi incruster des fissures du calcaire et pseudomorphoser des fossiles (fig. 105).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXIII

NICKEL ET COBALT

A. — NICKEL

1. Usages. — Les usages du nickel, connu depuis la fin du XVIII^e siècle, ont été longtemps très restreints : les mines de ce métal étaient surtout exploitées pour le cobalt qu'elles renferment.

L'industrie du nickel n'a pris un grand développement que depuis 1885 à cause de son utilisation dans *l'acier au nickel* pour la fabrication des plaques de blindage, des canons et des constructions métalliques. La teneur de ces aciers varie de 1 à 5 % de nickel. Ils possèdent une certaine élasticité et sont plus tenaces ; mais ils sont coûteux et ont l'inconvénient de se rompre au pliage et à l'écrouissage.

On a récemment appliqué en Amérique l'acier au nickel (à 3,5%) pour les rails des lignes de chemins de fer très chargées ; il pourrait en résulter une demande très forte en métal.

D'autre part, on introduit 20 à 25 % de nickel dans des aciers exigeant une forte résistance au choc (instruments scientifiques ; artillerie).

En outre, on fabrique des *objets en nickel*, ou on les recouvre d'une couche galvanique de nickel pour les préserver de l'altération (*nickelage*).

Le nickel entre dans la composition de certains *alliages* : *maillechort* (Cu, Zu, Ni) utilisé sous le nom de *Ruolz* pour les couverts, *argent allemand*, etc.

Soit pur, soit allié au cuivre, il sert à la fabrication de *monnaies d'appoint*.

Enfin, il peut être travaillé en feuilles, si on lui ajoute un peu de magnésium pour lui donner la ductibilité et la fusibilité nécessaires.

2. Commerce. — Le nickel a été longtemps rare et très coûteux :

1863	62 francs le kilogramme
1870	15 à 20 francs le kilogramme
1874	40 francs le kilogramme

Puis l'exploitation des mines de la Nouvelle-Calédonie a amené une baisse considérable du métal :

1885	8 à 9 francs le kilogramme

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

La concurrence du Canada l'a abaissé encore :

1892	5 francs le kilogramme
1895	2 fr. 40 le kilogramme

A la suite d'un accord entre les producteurs, le prix est remonté à 3 fr. 50 ou 4 francs de 1900 à 1910. En 1932, le nickel en planches ou en fils vaut environ 7,4 fr.-or le kilogramme ; en cubes, billes ou grains, 5 francs-or.

3. Statistique. — La production du nickel, qu'on peut estimer annuellement entre 40.000 et 65.000 tonnes, est fournie presque exclusivement par le *Canada* et la *Nouvelle-Calédonie.*

Au *Canada,* la principale région nickélifère est celle du *Sudbury.* Les minerais canadiens n'ont une teneur que de 2 à 3 % ; mais ils sont très abondants (1.412.000 tonnes en 1924 ; 1.992.000 tonnes en 1929 ; 2.115.000 tonnes en 1930) et donnent entre 30 et 60.000 tonnes de métal (35.000 tonnes en 1924 ; 58.000 tonnes en 1929 ; 61.000 tonnes en 1930).

La *Nouvelle-Calédonie,* presque seule productrice entre 1875 et 1890, est passée au second rang, loin derrière le Canada. Ses minerais présentent des teneurs plus fortes que ceux du Canada (jusqu'à 7 et 8 %) ; mais ils sont moins bien placés pour le traitement métallurgique (100.000 tonnes en 1910 ; 172.000 tonnes en 1914 ; 75.000 tonnes en 1921 et en 1924 ; 140.000 tonnes en 1929) et ne fournissent que 4 à 5.000 tonnes de métal (environ 10.000 tonnes en 1914 et 5.000 tonnes en 1929). Cette production est appelée à augmenter : on a capté des forces hydrauliques dans l'île pour traiter le minerai sur place.

Il y a en outre de petites productions de l'*Inde* (843 tonnes en 1929), de la *Norvège* (437 tonnes en 1929), des *Etats-Unis* (311 tonnes en 1929), de la *Tasmanie* (86 tonnes en 1929), de l'*Allemagne,* de la *France,* de la *Tchécoslovaquie,* de la *Grèce,* etc.

4. Minerais. — Les minerais utilisés ont varié avec les époques :

a) Vers 1840, les seuls exploités étaient : soit les sulfures, arséniures, antimoniures, sulfo-arséniures, sulfo-antimoniures, soit les minerais de cobalt nickélifères. Ainsi la *millérite* (NiS), la *nickéline* (NiAs), la *chloanthite* ($NiAs^2$), la *breithauptite* (NiSb), la *gersdorffite* ou *disomose* (NiAsS), etc.

b) Vers 1854, on a commencé à extraire une assez forte proportion du nickel des *pyrrhotines* qui peuvent en renfermer de 2 à 4 %.

c) A partir de 1875, on a exploité le minerai tout spécial à la Nouvelle-Calédonie, la *garniérite* (silicate de nickel et de magnésium, où le nickel et le magnésium peuvent se remplacer en toutes proportions) : 7 à 12 % de nickel.

d) Depuis 1889, on est revenu, avec le développement des mines canadiennes, aux *pyrites nickélifères* et *cuprifères.*

5. Modes de gisement. — Le nickel se présente d'abord comme un métal de profondeur, resté en inclusions, en ségrégations ou au plus en produits de départ immédiat dans des magmas ultrabasiques (péridotites, norites, gabbros).

Puis on passe progressivement de ces gisements à des types filoniens

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

beaucoup moins importants par l'intermédiaire d'imprégnations diffuses de profondeur.

Nous envisagerons donc successivement :

a) les gisements d'*inclusions* dans des péridotites, qui prennent une grande importance lorsque les phénomènes d'*altération* ont opéré la concentration du métal (garniérite de la Nouvelle-Calédonie) ;

b) Les *ségrégations périphériques* de *pyrrhotines nickélifères*, liées aux gabbros (Canada) ;

c) Les *imprégnations diffuses* ;

d) Les *filons proprement dits*.

Le minerai est associé au cobalt dans les types *a* et *d* ; au cuivre et parfois au platine, dans les types *b* et *c*. Dans les filons apparaissent, en outre, les métaux du groupe de l'étain et l'argent. Enfin, le nickel présente des analogies chimiques avec le fer.

6. Principaux gisements.

I. — Inclusions et altérations

Gisements de la Nouvelle-Calédonie. — Ils sont considérables; mais leur production est limitée par l'état du marché et la longueur du transport.

L'île, très allongée, semble avoir subi un premier mouvement d'âge primaire, puis des mouvements crétacés ayant séparé la Nouvelle-Calé-

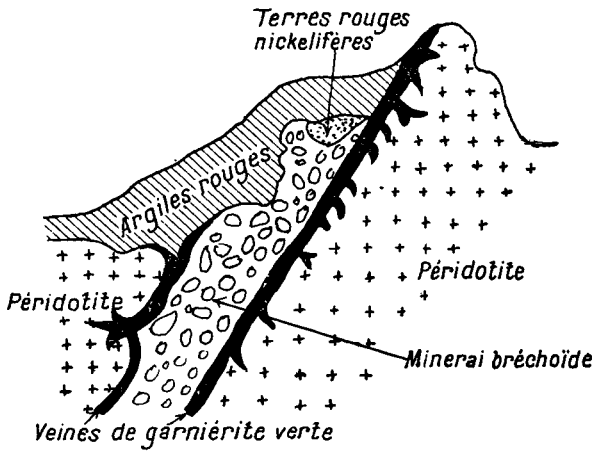


Fig. 106. — Croquis d'un gisement de la Nouvelle-Calédonie.

donie de la Nouvelle-Zélande ; vers ce moment se seraient produits des charriages, entraînant la mise en place de péridotites serpentinisées nickélifères sur le Crétacé, avec friction sur le soubassement. Le même fait a dû se produire pour les gisements serpentineux cuprifères de Monte Catini en Toscane et paraît offrir une sorte de généralité.

Les péridotites à enstatite, serpentinisées, occupent 1 /3 de l'île (au Sud-Est) et contiennent partout des traces de nickel, cobalt et manganèse et

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

des inclusions de fer chromé. Elles ont été craquelées suivant un réseau parallélépipédique, qui a ensuite permis la formation de veinules utilisables nickélifères à allure pseudo-filonienne (fig. 106). Elles ont été altérées superficiellement en terres rouges, d'aspect argileux, qui pénètrent plus ou moins dans les dépressions de la surface en y formant des poches ou vasques. Les terres rouges sont composées pour une grande partie de sesquioxyde de fer chargé d'oxydes de manganèse, nickel, cobalt et chrome. Le long des poches et dans les fissures, il s'est fait une concentration de la magnésie et du nickel, due certainement à un phénomène de remise en mouvement secondaire. Les veines ainsi formées cessent vite en profondeur (vers 80 mètres) ; elles sont surtout constituées par de la garniérite verte ; mais il y a aussi des minerais bruns presque aussi riches (minerais-chocolat).

En même temps, le cobalt et le manganèse se sont concentrés particulièrement dans l'argile sous forme de boules noires d'asbolane qu'on recueille par triage. On y trouve aussi des nodules de fer chromé (voir ci-dessus page 238). Les trois substances sont exploitées simultanément.

Ces exploitations donnent des minerais qui doivent tenir 6 à 7 % de Nickel après dessiccation ; comme on les livre humides, la teneur est en réalité de 5 %.

Cette teneur est relativement considérable ; mais les frais de transport du minerai sont très élevés ; aussi a-t-on essayé à plusieurs reprises de traiter les minerais sur place ; on s'est heurté à de grosses difficultés, tenant à la rareté et au prix élevé des combustibles. Actuellement, c'est toute une industrie hydroélectrique qui est en voie d'installation ; et, depuis 1920, les exportations ne se font plus guère que sous la forme de mattes à 77 % de nickel.

Autres gisements de garniérite. — Des gisements analogues de garniérite ont été signalés dans d'autres pays, mais ils ne paraissent pas avoir d'importance industrielle : en *Silésie*, en *Espagne* (près de *Malaga*), dans l'*Oural*, en *Californie*, en *Nouvelle-Zélande* et dans beaucoup des îles situées entre la Nouvelle-Calédonie et les îles de la Sonde.

II. — Ségrégations de pyrrhotines nickélifères et cuprifères

Gisements du Canada (Sudbury). — Ils sont localisés dans le district de Sudbury (Ontario) qui a pris un grand développement. Ce sont des types de profondeur. Les minerais y ont comme point de départ une ségrégation à la périphérie de norites (gabbros à hypersthène).

La formation de Sudbury se trouve dans une grande cuvette (50 × 24 kilomètres), synclinale, dont le fond est formé de gneiss laurentiens, de schistes, grauwackes, quartzites, tandis que la partie supérieure est occupée par des tufs et des schistes. Entre ces deux groupes, s'intercale une formation éruptive, presque interstratifiée, postérieure aux terrains superposés dans lesquels elle lance des apophyses et constituée par une norite passant à un granite à micro-pegmatite. Dans cette norite, vers son contact avec les terrains du toit, existent des minerais disséminés ; ils sont parfois en grains comme en Nouvelle-Calédonie ; mais, ailleurs, les minerais de nickel prennent un grand développement et on voit la pyrrhotine mouler tous les silicates de la roche.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les minerais consistent en pyrrhotine dominante avec 2 à 5 % de nickel, chalcopyrite et pyrite rare. Le nickel se trouve dans la pyrrhotine à l'état de pentlandite (sulfure de nickel et de fer). La proportion des métaux utilisables est très variable : tantôt 2 de nickel pour 1 de cuivre, tantôt

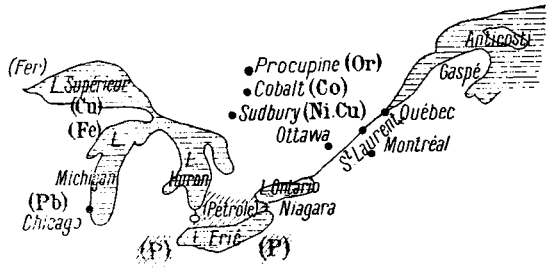


Fig. 107. — Carte des gisements miniers de la région des Grands-Lacs.

3 de nickel pour 1 de cuivre. Il y a quelquefois plus de cuivre que de nickel ; mais, en général, celui-ci domine. En outre, il faut noter la présence de platine disséminé : quelques mattes en contiennent 14 grammes par tonne. D'autre part on voit apparaître des traces d'étain. Quant au cobalt, il joue dans ces gisements un rôle insignifiant (0,05 à 0,1 % dans les minerais) ; il forme cependant un des plus grands gisements du monde dans une région voisine : le district de Cobalt.

L'exploitation du nickel de Sudbury a commencé en 1889 ; grâce à la situation du gisement sur la grande ligne de chemin de fer transcontinentale canadienne, les conditions d'exploitation sont très favorables.

Gisements de Scandinavie. — On retrouve en Norvège des gisements semblables à ceux du Canada. Des pyrrhotines nickélifères, accompagnées de chalcopyrite, s'y sont concentrées à la périphérie de massifs de norites à olivine, intercalés au milieu de gneiss et de schistes cristallins (fig. 108). On a pu y étudier les phénomènes de ségrégations magmatiques des gabbros. Le fer chromé n'apparaît pas, peut-être resté dans la partie centrale du massif éruptif.

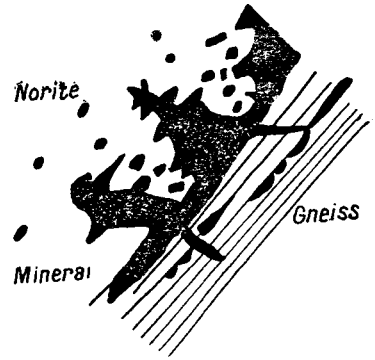


Fig. 108. — Ségrégation périphérique dans un massif de norite scandinave.

Gisements de la Haute-Italie. — Il existe aussi de nombreux petits gisements analogues dans les roches vertes du *Piémont* (*Varallo*, *Scopello*) : ils ne sont plus exploités.

III. — Imprégnations diffuses ; filons-couches

Gisements de Scandinavie. — On connaît en Suède et en Norvège, au

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

milieu des terrains métamorphiques, de grands amas de pyrite cuivreuse et de grandes zones de pyritisation diffuse, où se rencontre un peu de pyrrhotine nickélifère. Le nickel a tendance à se concentrer au contact des cassures transversales.

La pyrrhotine nickélifère peut former des imprégnations lenticulaires dans des schistes, au voisinage de gabbros, comme à *Ringérike* (*Norvège*), ou dans des gneiss, comme dans le *Smaland* (*Suède*) où le minerai tient 1,5 % de Ni et 0,5 % de Cu.

Gisements des Alpes. — Dans les Alpes, comme en Scandinavie, il arrive que des zones pyriteuses interstratifiées, à allure de filons-couches ou de fahlbandes, sont recoupées par des filons et présentent une concentration en nickel à leur intersection. Le phénomène est comparable à celui qu'on observe à Kongsberg où des fahlbandes s'enrichissent en argent au contact de filons transversaux. En réalité, ces zones pyriteuses, composées de pyrite, pyrrhotine, mispickel, ont, dans toute leur masse, une certaine teneur en nickel ; mais celui-ci n'est exploitable que sur les fissures, comme s'il y avait été concentré par l'action d'eaux de circulation, profondes ou superficielles.

Le principal gisement de ce genre est celui de *Schladming* en *Styrie*. La région formée de schistes cristallins, de gneiss, présente des zones imprégnées, de sulfures divers, qu'on appelle ici des *brandes* (zones brûlées) comparables aux fahlbandes. Au nombre de six principales, qui se prolongent sur des kilomètres de long et qui ont une épaisseur de 0 m. 50 à 30 mètres, ces brandes sont chargées de pyrite, pyrrhotine, mispickel. Elles sont recoupées par des filons à gangue de calcite, contenant du cuivre gris, du mispickel et des minerais argentifères. A leur rencontre, elles se chargent de nids de cobaltine, nickéline, smaltine et cuivre gris accessoire, qui peuvent avoir plusieurs mètres de long.

On retrouve des gisements analogues dans le *Valais*, au *Val d'Anniviers* à haute altitude, difficilement exploitables, avec des séries d'affleurements nickélifères produits par l'enrichissement de fahlbandes pyriteuses à l'intersection de filons transversaux.

Dans le **Mansfeld** (*Allemagne*), de même, d'assez fortes proportions de nickel (mispickel nickélifère) associé au cobalt se rencontrent dans des cassures (rücken) qui recoupent la couche cuprifère à allure sédimentaire.

IV. — Filons proprement dits

Ils ont été longtemps la seule source du nickel. Celui-ci y est révélé, même à faible teneur, par des enduits verts d'annabergite (arséniate hydraté) et le cobalt par des enduits rose d'érythrine (arséniate hydraté de cobalt). Il y a association constante avec le cobalt, quelquefois avec le cuivre ou avec le bismuth et, dans les gisements filoniens les plus nets, avec le plomb et le zinc. On passe progressivement à des types moins profonds où le cobalt et l'argent dominent, tandis que le nickel n'est plus qu'à l'état de traces. La gangue peut être formée de calcite, de sidérose ou de quartz.

En *Tchécoslovaquie*, à **Dobsina** ou *Dobschau*, on a exploité une série de filons de nickel et de cobalt qui se coincent en profondeur, avec gangue

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

de sidérose, calcite, ankérite et avec tourmaline. Ces filons sont enrichis à l'intersection de cassures transversales.

En *France*, il y a toute une série de faisceaux de filons de Co, Cu, Ni, Fe, Or, etc., à valeur industrielle médiocre à cause de leur éparpillement. La mine des **Chalanches** (*Isère*) à gangue de sidérose a été exploitée activemen au XVIII^e^ siècle et a été reprise au XIX^e^ ; l'association du cobalt et de l'argent a permis l'exploitation. Aux intersections des fractures, on a trouvé des poches remarquablement riches en argent.

En *Espagne*, sur le versant sud des Pyrénées, à **Gistain**, on a exploité de petits filons, au contact de schistes et de calcaires primaires, avec une minéralisation de blende, galène, pyrite, minerais de Co et de Ni et gangue de calcite.

En *Saxe*, à **Schneeberg**, le nickel intervient accessoirement dans d'importants filons où dominent le colbalt et l'argent, avec carbonate de manganèse, minerais de bismuth et d'uranium, gangue surtout quartzeuse, mais parfois aussi carbonatée. C'est un type acide.

B. — COBALT

1. Usages. — Les usages du cobalt sont assez restreints : longtemps en effet, le prix de ce métal a été très élevé. D'ailleurs le cobalt a le défaut, tout en étant moins fusible et plus dur que le nickel, d'être plus altérable.

Le *cobaltage* n'est que très peu employé dans la sellerie de luxe et la serrurerie d'art.

On fait quelques *alliages* de bronze et de cobalt pour coussinets ; ils sont durs et difficiles à travailler.

Le véritable emploi industriel du cobalt, connu au moins depuis le XVI^e^ siècle, est la préparation des *couleurs bleues et vertes* : le bleu de cobalt (oxyde de cobalt), aujourd'hui remplacé par le bleu Thénard (aluminate ; pour la céramique, les couleurs fines), le vert de Rinmann, etc.

2. Statistique. — La production mondiale du cobalt n'est guère que de 1.300 à 1.500 tonnes. En beaucoup de cas, ce métal n'est en réalité qu'un sous-produit.

Il a été longtemps fourni par les gisements filoniens de *Saxe* qui ont encore donné 82 tonnes de minerais en 1928. Il valait alors 60 francs le kilogramme d'oxyde.

Il baissa beaucoup de prix quand on le découvrit en *Nouvelle-Calédonie* dont la production suffisait alors à la consommation mondiale (environ 200 tonnes) et qui pouvait le fournir en Europe à 20 francs le kilogramme. A l'heure actuelle, cette production est insignifiante : 64 tonnes de minerais à 3 % (1923), 15 tonnes (1925).

Depuis 1906, les gisements du *Canada* (district de *Cobalt*) où le cobalt n'est qu'un sous-produit de l'extraction de l'argent, ont eu un véritable monopole. En 1929, ils ont fourni 422 tonnes de cobalt.

Toutefois, depuis peu, le *Congo belge* est devenu producteur important (700 tonnes de métal en 1929), de même que la *Birmanie* (110 tonnes de métal en 1929) et le *Yunnan chinois* (250 tonnes de minerais en 1929).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

3. Minerais.

a) Non oxygénés :

1. *Cobalt natif* :
2. *Arséniures* :

Smaltine ($CoAs^2$) : 28 % de Co ;

Chloanthite [(Co, Ni) As^2].

3. *Arséniosulfures* :

Cobaltine(Co SAs) : 35, 5 % de Co.

b) Oxygénés :

1. *Erythrine* ($H^{16}Co^3As^2O^{16}$).
2. *Asbolane* (oxyde de cobalt manganésifère).

4. Géologie. — Le cobalt est associé au nickel dans la plupart de ses gisements. Mais il tend à se séparer davantage de la roche primitive, à se concentrer dans des filons et à entrer dans des groupements acides ; par là, il se différencie du nickel.

Il existe ainsi des gisements cobaltifères où le nickel disparaît de plus en plus pour faire place aux minéraux du groupe stannifère (Mo, Ur et même Sn), ou à des métaux sulfurés.

Quelque chose d'analogue s'observe pour le chrome qui, généralement, se trouve en milieu basique, mais dont les gisements de crocoïse se rencontrent dans des roches acides.

En outre, le cobalt a tendance à se concentrer en surface et à former des nodules noir-bleuâtre d'asbolane au milieu des argiles d'altération superficielle.

5. Principaux gisements.

I. — Inclusions et ségrégations

Ce sont les mêmes gisements que ceux du nickel ; mais le cobalt y est toujours subordonné au nickel et, dans les ségrégations périphériques, au cuivre. Tels sont :

les gisements de *Nouvelle-Calédonie* (inclusions dans des péridotites) ;

les gisements du *Canada* (*Sudbury*) (ségrégations dans des norites).

II. — Filons

a) Filons cobalto-nickélifères a gangue carbonatée (sidérose calcite). — Ils ont été étudiés à propos du nickel : *Dobsina, Chalanches, Val d'Anniviers, Mansfeld.* Le cuivre y est un élément très constant.

b) Association du colbalt avec l'argent, un peu de bismuth et une gangue de calcite. — L'argent en forme le principal élément industriel ; on y retrouve un peu de nickel et une proportion assez sensible de cuivre.

District de Cobalt (Canada). — Ce district sera décrit au chapitre de l'argent (p. 383). Le gisement est en relation probable avec des intrusions huroniennes de gabbros et de diabases. D'innombrables craquelures verticales du sol se sont remplies, soit dans la diabase, soit dans les conglomérats

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

et schistes huroniens, par un groupement où dominent l'argent et le cobalt (smaltine argentifère, argent natif), avec bismuth, nickel et cuivre accessoires et avec une gangue de calcite. La métallisation se retrouve dans les vides mêmes de la pegmatite qui se détache en veines des massifs de diorites ; elle est donc postérieure à la mise en place de la pegmatite.

Guadalcanal (*Espagne*). — Ce gîte, important autrefois, présente des filons d'argyrose et d'argent rouge, avec des minerais cobaltifères et parfois avec du cuivre gris dans une gangue de calcite.

c) ASSOCIATION DU COBALT AVEC LES MÉTAUX DU GROUPE STANNIFÈRE ET GANGUE DE QUARTZ. — Il existe, en outre, des filons quartzeux où on trouve le cobalt associé avec le Cu et avec des minerais stannifères. On peut citer les gisements de *Norvège* (*Skuterud*), de *Suède*, du *Caucase* (*Dachkessan* près de la mine de cuivre de *Kédabek*) : Il y a là un accident local de filons cuprifères appartenant au groupe sulfuré avec gangue quartzeuse.

A **Balmoral** (*Transvaal*), on connaît des gisements anté-permiens de cobalt avec molybdénite. Ailleurs la tourmaline apparaît à côté du cobalt.

d) ASSOCIATION DU COBALT AVEC L'ARGENT ET AVEC GANGUE DE QUARTZ. **Schneeberg** (*Saxe*). — Ce district, qui sera étudié au chapitre de l'argent, comprend des filons quartzeux, en relation probable avec un granite, contenant du cobalt argentifère associé à du bismuth, de l'uranium, de la dialogite et de la tourmaline.

e) ASSOCIATION DU COBALT AVEC L'OR. — Il existe au **Transvaal** des smaltines très aurifères et au **Chili** des asbolanes aurifères. Le fait correspond à l'association intime entre l'or et le groupe stannifère.

III. — ALTÉRATIONS SUPERFICIELLES

L'altération superficielle de roches, de terrains ou de filons renfermant une certaine porportion de cobalt, tend à accroître la proportion relative du cobalt par rapport au nickel. Il se produit alors des associations caractéristiques de cobalt et de manganèse : les *asbolanes*.

Cette forme est très connue en **Nouvelle-Calédonie**, associée aux gisements de nickel et de chrome déjà décrits. Elle se présente en rognons caverneux ou en concrétions mamelonnées, grosses comme le poing, au milieu des argiles provenant de la décomposition des péridotites ; elle donne sous le pic des traces brillantes qui permettent de la distinguer des concrétions ferrugineuses. Teneur : au plus 10 % d'oxyde de cobalt.

En *Angleterre*, la mine de **Vœl Hiraddog (Pays de Galles)** montre un type d'asbolane concentrée superficiellement dans des poches d'argile remplissant les fissures du calcaire carbonifère : ces crevasses atteignent parfois une profondeur de 80 mètres sur 2 à 3 mètres de largeur. Le cobalt semble provenir de la destruction de filons légèrement cobaltifères.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXIV

CUIVRE

1. Usages. — Ce métal a des applications importantes. Il fut utilisé dès l'antiquité la plus reculée, d'abord seul, puis allié à l'étain (bronze). Il a été longtemps le métal par excellence, servant à la fabrication de la plupart des armes et des instruments aratoires, alors que le fer était réservé aux tout petits objets.

Puis il fut entièrement remplacé par le fer ; mais à l'heure actuelle, son utilisation est redevenue en faveur sous des formes nouvelles : soit en *électricité* grâce à ses propriétés conductrices, soit dans la *marine*. Le cuivre réservé aux applications électriques doit être très pur, car la présence de 1/2 % de soufre, de 1 % d'arsenic, d'un peu de plomb ou de bismuth le rend cassant.

Sa consommation augmente rapidement et son marché donne lieu à d'importantes spéculations.

A l'état de *cuivre rouge* (*cuivre pur*), très malléable, très bon conducteur de la chaleur et de l'électricité, ne s'oxydant que lentement à l'air, il est employé en barres, en plaques, en tubes, en *fils* (électricité, marine, distilleries, sucreries, raffineries, locomotives, etc.).

A l'état de *laiton* ou *cuivre jaune* (alliage de Cu et Zn), encore moins altérable à l'air, il sert dans la marine, la tréfilerie, la robinetterie, la fabrication des épingles, des tubes pour les usages domestiques, des cartouches, etc. La proportion de zinc diffère avec la destination de l'alliage : 40 % de zinc pour laiton forgeable, 33 % pour laiton malléable à cartouches. On lui ajoute presque toujours un peu de plomb et d'étain pour empêcher qu'il ne graisse les outils.

Parmi les autres alliages du cuivre, on peut citer : le *bronze* (Cu + Sn), utilisé pour pièces mécaniques, cloches, monnaies, objets d'art, etc. ; le *chrysocale* (Cu + Zn + Sn), pour les bijoux faux ; le *cuivre blanc* ou *tombac* (Cu + Zn + As), pour instruments de physique ; le *maillechort* ou *argentan* (Cu + Zn + Ni), pour la fabrication des couverts argentés, objets de sellerie, etc.

Parmi les sels de cuivre, le *sulfate de cuivre* a actuellement de grandes applications comme antiseptique, pour les maladies de la vigne (bouillie bordelaise, etc.), pour le chaulage des grains, le traitement des bois. Il est obtenu comme sous-produit dans les piles Bunsen où on remplace le

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

zinc par le cuivre. Il sert aussi à produire des teintes foncées (noir, lilas, violet) pour la teinture. La galvanoplastie en consomme également.

D'autres sels servent comme matières colorantes : *vert de Brunswick* (oxychlorure de cuivre), *vert de Scheele* (arsénite de cuivre), *vert de Schweinfurt* (arsénite et acétate de cuivre), *vert minéral* (carbonate bibasique), *cendre bleue* (carbonate sesquibasique).

De plus, la *malachite* (carbonate bibasique) est employée comme pierre d'ornement.

2. Statistique. — Dans l'ensemble, la production mondiale du cuivre a augmenté d'une façon très rapide :

20 à 25.000 t. au début du XIX^{e} siècle	1.408.000 t. en 1916
50.000 t. en 1850	560.000 t. en 1921
156.500 t. en 1880	904.000 t. en 1922
491.000 t. en 1900	1.480.000 t. en 1926
880.000 t. en 1911	1.930.000 t. en 1929
1.000.000 t. en 1913	1.590.000 t. en 1930

En 1929 et 1930, la production totale du cuivre se répartit ainsi entre les pays et par ordre d'importance :

	1930	1929	Divers
	tonnes	tonnes	
Etats-Unis	645.000	931.000	492.000 en 1911 ; 230.000 en 1921 [presque 1/2 *de la production mondiale*].
Chili	222.000	316.000	33.000 en 1911 [1/6 *de la production mondiale*].
Afrique	165.000	157.000	17.000 en 1911 ; 108.000 en 1925.
dont *Katanga*	118.000		
Canada	138.000	110.000	25.500 en 1911 ; 20.000 en 1921.
Japon	80.000	75.000	52.000 en 1911 ; 95.000 en 1918.
Mexique	68.000	79.000	62.000 en 1911 ; 12.000 en 1921.
Russie	49.000	37.000	43.000 en 1913 ; 2.000 en 1922 ; 13.500 en 1927.
Pérou	48.000	54.000	28.000 en 1911.
Espagne et Portugal	42.000	49.000	52.000 en 1911 ; 58.000 en 1925.
Allemagne	27.000	29.000	22.000 en 1911 ; 45.000 en 1916.
Yougoslavie	25.000	21.000	2.500 en 1920.
Norvège	17.000	15.000	12.000 en 1913 ; 550 en 1920.
Cuba	16.500	14.000	3.500 en 1913 ; 17.000 en 1928.
Australasie	15.500	14.500	47.000 en 1913 ; 27.000 en 1920.
Bolivie	5.000	7.000	4.000 en 1913 ; 11.000 en 1923.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les principales mines de cuivre sont :

Anaconda (Montana), Calumet and Hecla (Michigan), Rio Tinto (Espagne), Boston and Montana (Montana), Copper Queen (Arizona), Utah Copper (Utah), North Butte (Montana), Elisabethville et Kambove (Katanga), Mansfeld (Allemagne), etc...

Aux **Etats-Unis,** les principaux états et centres producteurs sont :

Etats-Unis	1930	1929	Divers
	tonnes	tonnes	
Arizona	269.000	376.000	180.000 en 1914.
Utah	93.000	148.000	71.000 en 1914.
Montana	90.000	136.000	110.000 en 1914 ; 160.000 en 1916.
Lac Supérieur (Michigan)	65.000	84.000	72.000 en 1914 ; 126.000 en 1916.
Névada	39.000	63.000	35.000 en 1924.
Nouveau-Mexique ...	34.000	45.000	35.000 en 1924.

Les grands districts de l'*Arizona* sont Bisbee, Clifton, Jérome ; du *Montana*, Butte avec Anaconda.

L'*Utah* (Bingham, Tintic) et le *Névada*, mis en valeur vers 1870-1880, puis considérés comme épuisés, sont repris et connaissent un grand développement depuis 1907. La production du *Lac Supérieur*, longtemps la principale des Etats-Unis, reste toujours considérable, avec tendance à baisser.

Le Chili, qui tenait vers 1880 la tête de la production mondiale, est considérablement descendu vers 1890. Son industrie cuprifère a beaucoup repris, grâce à des méthodes nouvelles.

En Afrique, les centres cuprifères sont dans la Colonie du *Cap* le *Namaqualand*, depuis 1910, surtout dans le *Katanga*, puis, depuis 1930, dans la *Rhodésia septentrionale* ; ces deux derniers groupes tendent à jouer un rôle croissant dans le marché du cuivre.

Le Japon a connu un accroissement rapide de sa production. Ses principales mines sont : *Kosaka, Ashio, Besshi.*

Au **Mexique,** la production vient, pour une part importante, du *Boléo* (Basse-Californie) ; au **Pérou,** du *Cerro de Pasco.*

Le groupe principal européen est en **Espagne** et en **Portugal** *Rio-Tinto, Tharsis, San Domingos*).

L'Allemagne tire son minerai du *Mansfeld* pour la plus grande partie et le reste du *Hartz* (Rammelsberg) ; la **Norvège,** de *Sulitjelma, Foldal, Röraas,* etc...)

Cuba n'a commencé à produire du cuivre que depuis 1907.

En Australasie, les principales mines sont dans le *Queensland* (Mount-Morgan), dans la *Nouvelle-Galles-du-Sud,* en *Tasmanie* (Mont Lyell), dans l'*Australie du Sud.*

En **Bolivie,** le grand producteur est le district de *Corocoro.*

En dehors de ces groupes, il y a peu de cuivre exploité ailleurs. En

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Europe, on a exploité des mines en *Cornwall*, en *Toscane* (Italie), un peu de cuivre dans l'*Oural* et dans le *Caucase*. Il n'y a pour ainsi dire rien en France ni même dans ses colonies (sauf au *Congo*).

L'exportation se fait : soit sous forme de minerais vers des usines de traitement situées sur le littoral ou en communication facile par eau avec la côte (Swansea, Hémixen près Anvers, Bords du Rhin, Hambourg, Givet, Harfleur, etc...), soit sous forme de mattes résultant d'un traitement au centre même d'extraction. Cette dernière forme tend à prédominer avec l'appauvrissement des minerais et l'épuisement des minerais riches. Les marchés principaux de mattes et minerais en Europe sont à Swansea, Londres, Anvers, Dunkerque, etc...

3. Prix du Cuivre. — Le marché du cuivre est un de ceux sur lesquels la spéculation se donne le plus librement carrière.

Longtemps réglementé par l'Angleterre, il est maintenant sous la dépendance des Etats-Unis qui fournissent la moitié du cuivre consommé, les autres pays producteurs étant très divisés. Il est possible que, dans l'avenir, le Katanga et la Rhodésia prennent la prééminence. A diverses reprises, on a essayé de réaliser une entente générale des producteurs et ces essais ont déterminé par moments une hausse considérable, suivie généralement d'une chute brusque.

On a tenté également d'attirer le marché du cuivre en France ; il y a eu de ce fait des spéculations malheureuses qui ont fait doubler momentanément le prix du métal, pour retomber ensuite au point de départ. Des opérations analogues ont été reprises récemment et il existe actuellement un marché du cuivre assez important en France et en Allemagne.

Le prix du cuivre varie du simple au double. Suivant les moments, un certain nombre de mines ouvrent ou ferment, agissant ainsi pour ramener le prix du cuivre à un taux normal. Actuellement, par exemple, de nombreuses mines ont fermé ou du moins ont fortement réduit leur production (1932). Voici quelques cours du métal pendant le XIX^e^ siècle :

1800	3.900	francs	la tonne
1840	2.100	»	»
1860	3.700	»	»
1886	955	»	»

A ce moment eut lieu la « spéculation des métaux » qui porta le prix à 2.140 francs (en 1887) et qui le fit tomber à 1.350 francs en 1889.

1894	950	francs	la tonne	1919.....	2.275	fr.-or	la tonne
1900	1.880	»	»	1921.....	1.750	»	»
1902	1.140	»	»	1923.....	1.625	»	»
1907	2.200	»	»	1927.....	1.450	»	»
1910	1.350	»	»	1928.....	1.375	»	»
1912	1.600	»	»	1930.....	1.800	fr.-or	la tonne
1916	2.875	»	»	1932 (avril)	750	fr.-or	la tonne (30 £).

4. Minerais. — Les minerais riches, minerais de cuivre proprement dits, ne jouent qu'un rôle de plus en plus restreint sauf dans quelques mines très spéciales. Ce n'est guère que dans la zone de cémentation qu'on les

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

trouve momentanément développés. Quand on descend plus bas, on arrive dans une zone d'exploitation durable où les sels de cuivre, à l'état d'éléments presque microscopiques, se dissimulent dans les minerais d'un autre métal, pratiquement la *pyrite de fer cuivreuse*, tenant de 1 à 3 % de cuivre (1).

Parmi les minerais proprement dits, on trouve :

a) Des minerais sulfurés purs :

Chalcopyrite (Cu Fe S^2 — 34, 5 %) ;

Erubescite, phillipsite ou *cuivre panaché* ($3Cu^2S,Fe^2S^3$ — 60 %) ;

Chalcosine (Cu^2S — 80 %) ;

Covelline (CuS — 66 %) ;

b) Des minerais sulfurés impurs :

Cuivres gris (*fahlerz*) tenant de 15 à 48 % de Cuivre, avec arsenic, antimoine, fer et souvent argent ; la plupart sont antimonieux (*panabase* ou *tétraédrite, freibergite*) ; d'autres sont arsénieux (*tennantite, énargite*). *La bournonite* est un sulfo-antimoniure de Cu et de Pb (13 %) :

c) Du *cuivre natif* qui se présente dans des conditions spéciales : c'est un produit d'altération superficielle qui disparaît rapidement en profondeur (sauf au Lac Supérieur où il persiste jusque vers 2.000 mètres) ;

d) Des minerais oxydés qu'on rencontre aux affleurements, dans la première période d'exploitation :

Cuprite (Cu^2O — 89 %) ;

Carbonates (*malachite* à 57 %, *azurite*) ;

Phosphates, arséniates, vanadates, silicates (*dioptase, chrysocolle*).

5. Rôle métallogénique. — Le cuivre forme la transition entre le groupe de l'étain et celui du zinc et du plomb, associé tantôt à l'un, tantôt à l'autre.

Il est associé au type stannifère quand les gisements d'étain prennent un caractère filonien bien accentué ; les autres sulfures s'y développent alors progressivement.

Il s'associe au plomb, et au zinc, dans le groupe B. P. G. La chalcopyrite y apparaît en même temps que la pyrite de fer et s'accompagne parfois de mercure, l'un des métaux les plus superficiels.

Mais il peut se trouver aussi avec des métaux très profonds comme le platine, quand il est dû à des ségrégations de roches basiques.

Le cuivre a donc un rôle intermédiaire qui accuse sa relation avec les roches éruptives, relation qui s'atténue avec les métaux suivants (Pb, Zn, etc...).

Le nombre des gisements où le cuivre est intimement lié à la roche mère (basique, neutre ou acide) est considérable.

En partant des inclusions dans les roches éruptives, on rencontre successivement les gisements suivants, en s'éloignant de plus en plus de la roche mère :

(1) Teneur en cuivre dans quelques grandes mines : Anaconda, 2,8 % ; Arizona, 2,3 % ; Falun, 3 % ; Mansfeld, 2,86 % ; Mt Lyell (Tasmanie), 2,35 % ; Rio Tinto, 2,26 %.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

I. — *Inclusions* (dans des roches acides, neutres ou basiques) ;
II. — *Ségrégations* en milieu basique :
a) Association du cuivre et du nickel dans des ségrégations à la périphérie des norites (Type : Sudbury) ;
b) Ségrégations simplement cuprifères dans des gabbros (Type : Monte-Catini).
Puis des gîtes dus à un commencement de départ :
III. — *Amas, fahlbandes, imprégnations diffuses* ;
IV. — *Gîtes à allure filonienne, en rapport direct avec la roche éruptive* ;
V. — *Gîtes de contact en terrain calcaire* (Type : Banat).
Ensuite les filons hydrothermaux proprement dits :
VI. — *Filons de départ acide* ;
VII. — *Filons cupro-plombifères* ;
VIII. — *Filons de chalcopyrite et cuivre gris.*
Enfin les gisements liés à une altération, à un remaniement :
IX. — *Gisements de cuivre natif* (Lac Supérieur) ;
X. — *Gisements à allure sédimentaire* (Types : Mansfeld, Boléo).

6. Principaux gisements.

I. — INCLUSIONS

On rencontre le cuivre en inclusions dans les diverses catégories de roches éruptives :

1° En Roches acides. — Ce sont surtout des pegmatites, des granites à tourmaline et à fluorine, des microgranites, etc., qui contiennent de la chalcopyrite disséminée. Au **Montana,** on connaît ainsi des rhyolithes cuprifères. Cette relation avec les roches acides apparente le cuivre à l'étain : elle conduit à un groupe de gisements filoniens où le cuivre s'est concentré au voisinage de semblables roches, en association avec l'étain.

2° En Roches neutres et basiques. — Ce sont surtout les roches neutres et basiques qui accusent de fréquentes inclusions cuprifères : monzonites (*Arizona*), syénites (*Banat*), porphyrites ou andésites, gabbros, norites, diabases, mélaphyres **Lac Supérieur.** Le cuivre, englobé dans ces roches sous forme d'inclusions dans certains cristaux, manifeste une tendance à se concentrer secondairement, lors des altérations superficielles, en amygdales ou veinules dans lesquelles il est associé à de la calcite et à des zéolithes. Le type le plus net de ces amygdales cuprifères est réalisé dans les mélaphyres du **Lac Supérieur** qui ont eu une très grosse importance industrielle : le gisement sera étudié à part.

On a signalé le même phénomène, mais moins important, en d'autres points. Aux îles *Færœr*, existent des mélaphyres et des basaltes cuprifères. Près de *Bourgas* (*Bulgarie*), des andésites amphiboliques renferment des boules de cuivre natif, que l'on recueille en pulvérisant la roche. En *Transbaïkalie,* des mélaphyres contiennent des veines et amas de cuivre natif avec argent natif et gangue de zéolithes. Il en est de même dans la *Steppe kirghise* et dans les *Tien-Chan*. Au *Yunnan*, on a un mélaphyre avec amygdales de quartz améthyste et de calcédoine, parfois imprégnées de cuivre. Dans le *Queensland,* les amandes de cuivre natif avec calcite et

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

zéolithes se trouvent dans les dolérites. A *Madagascar*, au S.-W. de Majunga, existent des roches supra-crétacées ou tertiaires avec tufs connexes altérés, contenant de magnifiques zéolithes avec des masses d'opale cuprifère et de chrysocolle englobant du cuivre natif, de la cuprite, de la malachite, etc.

II. — SÉGRÉGATIONS BASIQUES

Au milieu des roches basiques, le cuivre inclus peut se rassembler en amas ségrégés plus ou moins volumineux et présente parfois une certaine tendance à sortir de la roche ou à s'accumuler à sa périphérie.

a) Nous avons déjà étudié les ségrégations de phyrrhotine nickélifère et cuprifère du **Canada (Sudbury)**, sur le pourtour de massifs de norites (voir chapitre du nickel).

b) Il existe aussi des ségrégations de cuivre où le nickel n'apparaît pas. En Italie, depuis Gênes jusqu'à Florence **(Ligurie** et **Toscane)**, on connaît des exemples tout à fait caractéristiques de ségrégations cuprifères liées au groupe des roches vertes (gabbros, euphotides, péridotites, diabases, serpentines, etc.) ; ces roches sont encaissées au milieu de terrains divers (Eocène, Crétacé) et se présentent souvent comme des écailles charriées.

Tel est le **gîte de Monte-Catini**, en *Toscane*, près de Volterra, autrefois très célèbre, aujourd'hui épuisé. La région est formée d'Eocène supérieur (argiles marneuses avec un peu de calcaire), sur lequel reposent des nappes de roches vertes (diabase ou gabbro rosso), sans aucune racine éruptive, mises en place par un charriage. La diabase elle-même est traversée de fentes presque verticales, minéralisées, qui ont laissé croire d'abord à un gîte filonien analogue à tous les autres. Ces fentes, larges de 3 à 5 mètres, contenaient des minerais d'altération très riches, chalcosine, érubescite, cuivre natif, avec zéolithes ; c'étaient les *filons rouges*.

En outre, les phénomènes de charriage ont développé, à la base de la nappe et aux dépens de la diabase qui semble avoir renfermé originellement des ségrégations de pyrite cuivreuse, une véritable mylonite qui constitue le *filon blanc*. Celui-ci, épais de 20 à 50 mètres, est composé d'une argile verdâtre stéatiteuse englobant des fragments de diabase plus ou moins serpentinisés et des boules arrondies de minerais cuprifères, provenant des masses ségrégées, disloquées par le phénomène mécanique. Ces boules, souvent grosses comme le poing, mais quelquefois aussi pesant plus de 100 tonnes, semblent avoir été formées, primitivement, de pyrite cuivreuse et de chalcopyrite. Les phénomènes d'altération ont peroxydé le fer de la pyrite à la partie superficielle de ces boules, donnant des croûtes d'oxyde, susceptibles de tomber et de se renouveler. Ce départ du fer et l'enrichissement en cuivre qui en résulte ont eu pour effet de transformer la chalcopyrite en érubescite à la périphérie des boules de minerai. Ces boules, lorsqu'elles sont assez volumineuses, apparaissent donc avec un noyau central de chalcopyrite et une enveloppe d'érubescite et, lorsqu'elles sont petites, entièrement formées d'érubescite. Dans le filon blanc, on ne trouve pas trace de minerais de cémentation, comme la chalcosine et le cuivre natif, qui existent dans les filons rouges.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Il y a donc à Monte-Catini superposition de plusieurs phénomènes :

1. Ségrégations ;
2. Charriages avec dislocations mécaniques ;
3. Altérations postérieures.

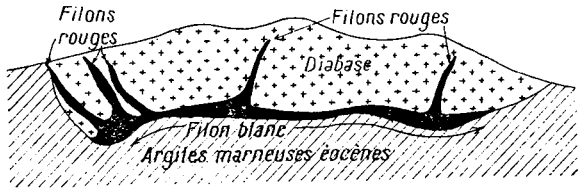


Fig. 109. — Coupe schématique du gisement de Monte-Catini.

Le même type de gisement se retrouve en **Corse** (*Ponte-Leccia*), au Nord de Corte, où une tentative d'exploitation a été malheureuse, en **Grèce, en Arménie,** peut-être dans l'**Allier** (*La Prugne*).

III. — IMPRÉGNATIONS DIFFUSES, AMAS

Ces gisements sont dus à des phénomènes de profondeur, liés au métamorphisme granitique, qui font pénétrer les sulfures, soit entre les feuillets des schistes, soit dans des zones de broyage (fahlbandes), soit dans des bâillements de ces schistes (amas). Ils sont à l'état de pyrite plus ou moins cuivreuse, au milieu de terrains généralement métamorphiques, plus rarement peu ou non métamorphiques. Leur importance industrielle est considérable.

a) Amas dans des terrains métamorphiques (a type archéen). — Ce type est bien représenté en **Scandinavie,** plateforme ancienne ayant subi un métamorphisme profond, où les roches sont des gneiss, des micaschistes, des quartzites, des talcschistes, des chloritoschistes, des leptynites, etc. Les mines, en voie d'épuisement, ont joué un grand rôle autrefois.

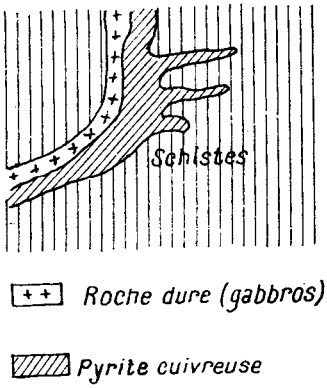


Fig. 110. — Coupe théorique d'un amas de pyrite cuivreuse au contact d'un gabbro à Röraas.

Les gîtes y présentent toutes les formes : lentilles, amas, fahlbandes, imprégnations diffuses feuillet par feuillet, prenant parfois l'apparence de filons-couches ; l'allure est quelquefois si nettement interstratifiée qu'on a pu se demander si les minerais n'étaient pas contemporains du dépôt.

La métallisation consiste en pyrite de fer tenant souvent un peu de cuivre (jusqu'à 3 %), accompagnée dans certains cas de galène, blende, molybdène et or. Les phénomènes de cémentation sont très peu développés.

Il y a généralement relation, au moins de position, avec des gabbros.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

A **Roraas** (*Norvège*), on connaît toute une série de petits gisements, exploités depuis longtemps, intercalés dans les schistes micacés et les chloritoschistes : ce sont de petits amas, à apparence ou interstratifiée ou intrusive. L'un d'eux a une allure filonienne et suit exactement le contact d'une veine de gabbro qui tantôt recoupe les schistes, tantôt s'y interstratifie (fig. 110). Il a une épaisseur de 2 à 6 mètres. Il contient fréquemment des intercalations schisteuses. Sa teneur est assez faible dans l'ensemble ; cependant, après triage, on est arrivé jusqu'à 5-6 % de cuivre, à cause de la présence de quelques noyaux de chalcopyrite et d'érubescite dus à la cémentation. Il y a association de la pyrite plus ou moins cuivreuse avec de la pyrrhotine et parfois de la blende.

A **Foldal** (*Norvège*), on a exploité des amas lenticulaires de pyrite, interstratifiés dans des schistes et des leptynites. Les imprégnations pyriteuses se succèdent sans continuité et en passant d'une strate à l'autre sur environ 1 kilomètre de long. L'amas le plus important a été reconnu sur 220 mètres de long et 120 mètres de profondeur, avec une épaisseur moyenne de 4 à 5 mètres (fig. 111).

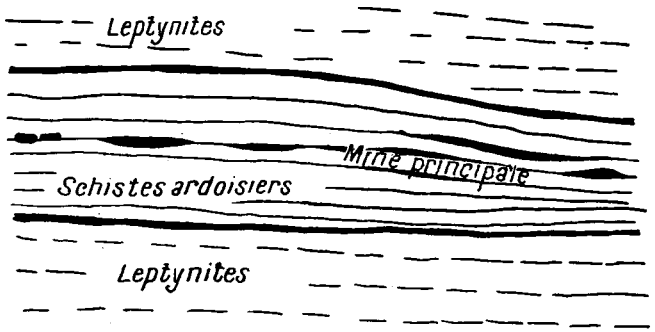


Fig. 111. — Plan du gîte de Foldal.

Le gisement de **Vigsnaes** (*Norvège*) est situé dans une île entre Bergen et Stavanger. Il a été exploité activement jusqu'en 1890. C'est un grand amas de pyrite cuivreuse (3 à 4 %) décelé à l'affleurement par un chapeau de fer de petites dimensions ; en profondeur, il se renfle subitement, puis se subdivise en trois rameaux inégaux et parallèles ; le rameau le plus puissant se bifurque à son tour. La masse du minerai finit par former quatre couches distinctes dont certaines arrivent à se coincer (fig. 112).

A **Falun,** en *Suède,* le type de l'amas est mieux réalisé (au N.-W. de Stockholm). C'est l'un des gisements les plus anciennement exploités (depuis 1120). Les terrains de la région consistent en gneiss, schistes micacés passant à des quartzites, leptynites, avec un massif de granite et quelques massifs de gabbro. Les amas sont encaissés dans les quartzites micacés. Le principal a la forme d'un sac de 200 mètres de diamètre, largement ouvert en haut et fermé en bas, dont on a trouvé le fond vers 330 mètres. Il est formé de pyrite cuivreuse (2 à 3 %) avec veines rectilignes de chalcopyrite. Tous ces amas sont en relation avec des filons de diabase et avec des veines talqueuses bréchiformes, appelées *sköl,* renermant de la magnétite, des grenats et des lentilles pyriteuses : le sköl

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

représenterait un remplissage de fentes. L'*or* est présent dans le gisement. Il est inclus, sous une forme généralement invisible, dans des bandes de quartz blanc, au milieu du minerai lui-même. Il s'accompagne de sulfo-séléniure de bismuth et de plomb, blanc d'argent et à forme bacillaire, donnant une sorte de tricotis à la surface. C'est ce minéral qui sert à déceler les parties aurifères.

A **Kongsberg** (*Norvège*), nous trouvons le type de **fahlbandes** : ce sont des zones de broyage, de laminage, qui ont été facilement parcourues par les venues sulfurées et cimentées par de la pyrite. Elles n'ont généralement pas d'intérêt industriel. Celles de Kongsberg renferment une très faible teneur en cuivre ; mais nous verrons qu'elles ont permis la précipitation de l'argent dans des veines qui les recoupent transversalement.

Ces divers types se retrouvent dans les plates-formes primitives, à **Terre-Neuve**, en **Afrique australe** (*Namaqualand*), **dans l'Inde**, en **Sibérie**, au **Brésil**.

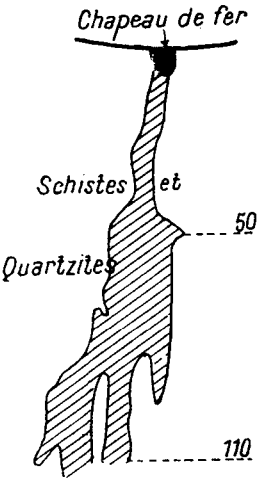


Fig. 112. — Coupe verticale du gîte de Vigsnaes.

b) AMAS DANS DES TERRAINS NON MÉTAMORPHIQUES (ZONES HERCYNIENNES ET TERTIAIRES). — Les régions où ils se rencontrent sont moins nombreuses que les précédentes. Les amas de pyrite cuivreuse s'intercalent sous forme d'énormes boules dans des terrains sédimentaires, fossilifères. On a quelquefois voulu les considérer comme d'origine sédimentaire. Cette hypothèse est insoutenable, étant donné leurs dimensions, leur homogénéité, etc. Au cours de la sédimentation, il se serait forcément intercalé quelques éléments terrigènes, régulièrement stratifiés, dont on ne trouve pas trace. Cependant la teneur en cuivre des amas est un peu variable ; elle diminue souvent vers la profondeur et augmente vers le contact avec les terrains encaissants ; cette variation est probablement le résultat de phénomènes superficiels de cémentation.

Ce type d'amas, encaissés dans des terrains non métamorphiques, est bien réalisé dans la Province d'**Huelva**, au S.-W. de l'**Espagne**. Il y a là tout un groupe à cheval sur le Portugal (*San-Domingos*) et sur l'Espagne méridionale jusqu'à Séville (*Tharsis, Rio Tinto, La Poderosa*). Les amas, de dimensions et de formes très variables (tantôt en boules, tantôt allongés en filons), se trouvent dans les terrains primaires jusqu'au Carbonifère inclus (schistes, grauwackes, phyllades du Silurien ; schistes argileux dinantiens) ; ces terrains ont été plissés à l'époque hercynienne et recouverts en certains points par du Permien discordant. Il existe, en outre, une série d'alignements de roches éruptives interstratifiées : microgranulites, avec tous les types de passage aux porphyres pétrosiliceux, et diabases à structure ophitique. Les minerais se rencontrent dans la même zone que ces roches et souvent à leur contact ; aussi peut-on penser qu'ils sont en relation d'origine avec le porphyre.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les amas sont tantôt parallèles à la stratification, tantôt un peu obliques ; ils ont une disposition lenticulaire ; ils disparaissent en profondeur.

Dans tous ces gisements, il faut tenir compte des phénomènes d'altération et de cémentation. Les roches de la région ont subi l'action des eaux devenues vitrioliques en circulant dans un pays aussi imprégné de sulfures de fer : les porphyres sont très kaolinisés ; les schistes sont blanchis. Les amas, eux-mêmes, ont, à la partie supérieure, un chapeau de fer bien développé, épais de 20 à 40 mètres, sous lequel vient une zone d'enrichissement où la masse pyriteuse est sillonnée de veines de chalcopyrite, d'érubescite, de chalcosine, parfois de cuivre natif. Les exploitations

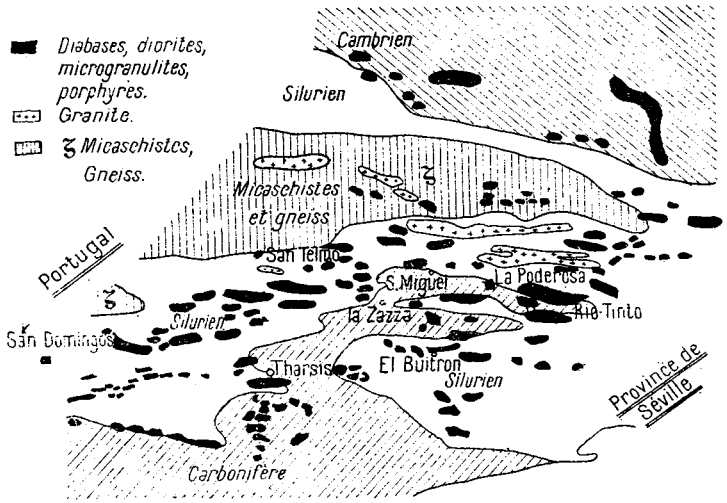


Fig. 113. — Carte géologique de la région des gisements cuprifères de San-Domingos, Rio-Tinto, etc.

modernes n'ont trouvé que peu de ces veinules riches, en partie épuisées par les Romains qui les exploitaient par petites galeries ; aussi la teneur moyenne du minerai s'est-elle très vite abaissée à 3 et même 2 %. Ces veines minces sont dues à l'incrustation de fissures, selon lesquelles se sont produits les phénomènes d'enrichissement, grâce aux infiltrations d'eaux chargées de sels de cuivre provenant des zones supérieures. Elles donnent parfois l'impression de filons.

Le gisement le plus important, celui de **Rio-Tinto,** constitue l'une des plus grandes mines du monde. Il a d'abord été exploité par les Phéniciens et les Romains, puis repris au xv^{e} siècle, abandonné à nouveau au moment de la découverte de l'Amérique et enfin repris vers 1850. Son exploitation, à ciel ouvert et souterraine, a un développement considérable. Le gîte est intercalé dans les schistes dinantiens plissés qui, à son voisinage, sont eux-mêmes imprégnés de pyrite de fer. Il est constitué par deux grands « filons » en contact avec des porphyres également pyriteux

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

(microgranites) (fig. 114). Le filon du Nord a 2 kilomètres × 150 m. (fig. 115). L'un des amas de **Tharsis** a 600 mètres × 140 mètres ; celui de **San Domingos**, 500 mètres × 60 mètres. On trouve, comme cas extrêmes,

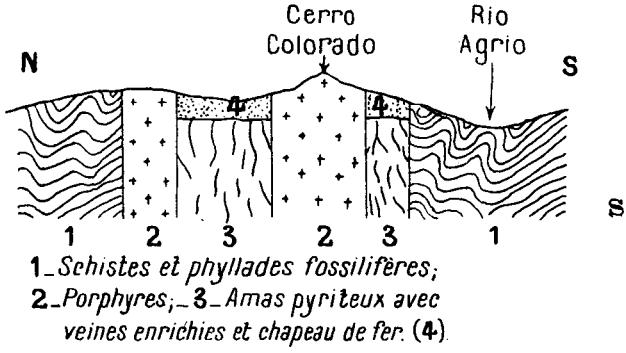


Fig. 114. — Coupe schématique du gîte de Rio-Tinto.

de véritables veines, de 7 ou 8 mètres de largeur, rappelant tout à fait les filons.

Le type d'amas encaissés dans des terrains non métamorphiques existe aussi dans d'autres zones hercyniennes : à **Schmollnitz** (*Haute-Hongrie*),

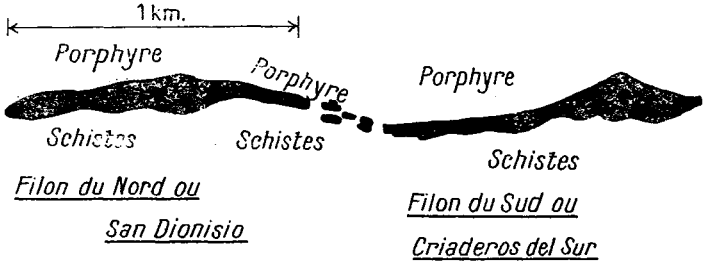


Fig. 115. — Plan des amas de Rio-Tinto.

dans l'**Oural**, en **Bukowine**, à **Agordo** (*Vénétie*), au **Mount-Lyell** (*Tasmanie*). L'amas d'Agordo est le premier gisement pyriteux de ce type qui ait été mis en évidence ; il avait paru colossal au début ; il est maintenant complètement vidé.

Dans les zones tertiaires, les amas sont rares. On en connaît cependant en **Californie**, dans le comté de *Shasta*.

IV. — GITES FILONIENS EN RAPPORT DIRECT AVEC DES ROCHES ÉRUPTIVES NEUTRES OU ACIDES

Ces gisements dérivent de roches intrusives et de roches effusives microlithiques (microgranites, rhyolithes, trachytes, andésites...). Ils sont particulièrement développés dans les régions éruptives tertiaires (Ouest-Américain, Japon, Arménie, Algérie, etc.) et y constituent souvent des filons

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

de grande importance industrielle. Ce sont des veines formées par le remplissage de fissures dans la roche mère ou dans les terrains immédiatement voisins (de nature non calcaire : les gisements en terrain calcaire étant étudiés à part dans le chapitre suivant). Il s'agit d'une sorte de ségrégation périphérique avec commencement de départ. Le remplissage est complexe et le cuivre y est associé aux autres métaux sulfurés (plomb, zinc, fer).

En **Serbie**, à *Maidanpek* et à *Bor*, existent des veines de pyrite et de chalcopyrite, avec quartz, érubescite, cuivre gris, blende et galène, dans des andésites et les terrains voisins.

En **Algérie**, surtout le long de la côte entre Bougie et Bône, on connaît des filons de sulfures complexes, notamment de chalcopyrite et cuivre gris, directement en relation avec une série tertiaire de granites, microgranulites, trachy-andésites, liparites, etc. Le cuivre n'y joue, au point de vue industriel, qu'un rôle secondaire.

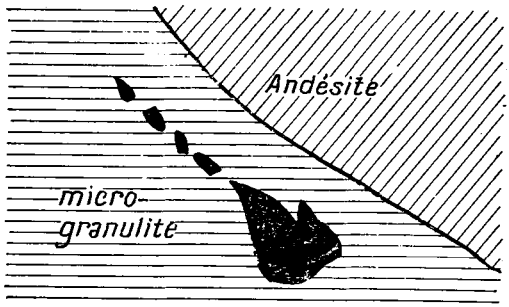


Fig. 116. — Coupe verticale des amas de Kedabek.

Dans le **Caucase**, on observe, en relation avec des roches éruptives généralement secondaires, des veines siliceuses contenant des sulfures qui ont incrusté tantôt les fissures de ces roches, tantôt les terrains immédiatement voisins. A *Kedabek* par exemple, on a des amas filoniens en chapelets dans une microgranulite jurassique, sous des coulées d'andésite (fig. 116). La minéralisation comprend : des sulfures complexes de fer, cuivre, plomb et zinc, de la magnétite, des traces d'or et d'argent. La présence d'une gangue silicatée (grenat, amphibole, pyroxène, épidote, etc.) accuse déjà les actions métamorphiques en milieu calcaire. Dans les parties hautes du gisement, les altérations ont donné naissance à des minerais oxydés (oxyde noir de cuivre), à de la covelline, du cuivre natif, du gypse, de l'oxyde de fer.

Au **Yunnan**, existent un grand nombre de mines exploitées depuis fort longtemps. Le cuivre, très abondant, y est associé avec des roches de la famille des andésites ou porphyrites. Suivant les cas, il a été entraîné plus ou moins loin de la roche-mère, en sorte qu'on a, avec une même origine profonde, des gisements d'aspects fort divers, depuis de simples fissures incrustées dans la roche-mère, ou des gîtes de contact, jusqu'à des veines passant à des filons ou à des filons-couches dans les schistes voisins. Il y a enrichissement quand ces filons traversent des bancs calcaires. Le

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

remplissage est à gangue quartzeuse. Le cuivre est peut-être en relation d'origine avec l'étain des mines de la région.

Au **Tonkin**, on a décrit divers petits gisements cuivreux en relation étroite avec des roches d'intrusion ou d'épanchement.

Au **Japon**, la pyrite de fer cuivreuse s'associe aux métaux précieux (or et argent). Les principaux districts métallisés sont ceux d'*Ani*, d'*Osarizawa*, d'*Ashio*, etc. Les gisements sont en rapport direct avec des dykes de roches éruptives tertiaires (andésites, liparites, dacites, rhyolithes). Ce sont des veines de quartz, souvent ramifiées en stockwerk, qui traversent les terrains au voisinage des roches éruptives et parfois ces roches elles-mêmes et qui contiennent des sulfures métalliques divers ayant pu subir une altération superficielle. Les veines passent, tantôt à des masses volumineuses, tantôt à de véritables filons.

Dans le **Montana** (*Butte*, *Anaconda*), où la série pétrographique comprend des monzonites ou granites à pyroxène, traversés par des aplites et par des rhyolithes, tous les filons métallifères ont été trouvés dans le granite et non dans la rhyolithe, mais au contact ou au voisinage de cette dernière. Il est vraisemblable qu'il y ait relation d'origine entre elle et la métallisation. La forme est nettement filonienne, résultant de fractures nettes. Les filons, toujours quartzeux, y sont remarquables par leur puissance, leur richesse constante et leur régularité. Celui de l'Anaconda, un des plus riches du monde, a quelquefois 30 mètres de largeur sur 600 mètres de long et autant de profondeur. Le remplissage contient surtout du cuivre, de l'argent et de l'or en proportions variables. En profondeur, le cuivre, associé à la pyrite et au quartz, est à l'état de chalcopyrite argentifère, cuivre gris arsenical, énargite ; dans la zone de cémentation, à l'état d'érubescite, chalcosine, covelline (avec teneur triple de la teneur originelle). La zone d'oxydation ne tient que peu de cuivre, mais est très riche en argent.

Les filons, surtout argentifères, contiennent une proportion notable de silicate de manganèse qui s'oxyde aux affleurements. On divise les minerais en deux groupes : les *millings* (minerais qui sont soumis au bocardage, puis à l'amalgamation) et les *smeltings* (minerais qui sont soumis à une fusion et donnent des mattes cuivreuses, argentifères et aurifères).

En 10 ans, on a retiré du groupe d'Anaconda pour 1.200 millions de métaux ; mais on y travaille sur des minerais de plus en plus pauvres. En 1887, la teneur était de 11 % de Cu et même, dans certaines mines, 14 et 15 %. Actuellement, la teneur est de 3 à 4 %.

V. — GITES DE CONTACT EN TERRAIN CALCAIRE (TYPE BANAT)

Alors que les gisements précédents sont en relation d'origine avec les roches acides ou neutres et se rapprochent des filons, les gisements du type Banat dérivent de roches basiques ou neutres et sont presque encore des gîtes de ségrégation périphérique. Ils se trouvent en terrain calcaire, au contact immédiat de syénites, quelquefois de diorites. Les réactions

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

métamorphiques y ont développé des silicates : la gangue est donc constituée par des grenats, pyroxènes, amphiboles, épidotes, englobant des noyaux de magnétite ou de chalcopyrite. C'est, tantôt l'un, tantôt l'autre de ces éléments qui domine. D'autres sulfures peuvent d'ailleurs apparaître.

Nous avons déjà étudié au chapitre du fer les gisements classiques du **Banat** et de **Traverselle** (*Piémont*).

Le même type est réalisé dans **l'Oural** où les gisements ont été très exploités autrefois. Un certain nombre ont été décrits au Chapitre du fer parce que la magnétite y domine ; mais on a laissé de côté ceux où domine la chalcopyrite. A *Mednoroudiansk*, près du Mont *Vissokaya* (fig. 117), le gîte s'est formé au contact de calcaires dévoniens et d'orthophyres avec production de grenats. Mais le développement exceptionnel des phéno

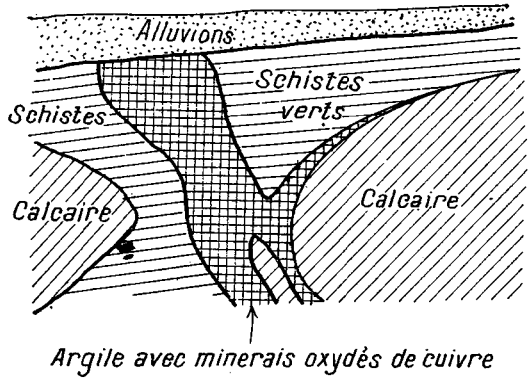


Fig. 117. — Coupe d'un gîte de Mednoroudiansk.

mènes d'altération superficielle récente lui donne une allure particulière. La roche éruptive a été transformée en une matière terreuse verdâtre contenant du feldspath décomposé et de la chlorite, avec argile rouge cuprifère au contact. De même, les calcaires ont été altérés en produits argileux. Il en résulte de grandes poches de décomposition argileuse ayant jusqu'à 120 mètres de large, au milieu des calcaires disloqués. C'est dans ces poches que se rencontrent les minerais, eux-mêmes altérés en oxydes, carbonates, phosphates, silicates, sulfates de cuivre, avec du cuivre natif. On y a trouvé notamment des blocs de malachite de grandes dimensions. En outre, il s'y associe de la calamine provenant de la blende du gisement primitif, de l'asbolane (manganèse + cobalt), des vanadates et des oxydes de fer (magnétite ou hématite). La présence du phosphate de cuivre montre qu'il devait exister à l'origine de l'apatite.

Des gisements du même genre sont exploités dans le **Turkestan russe** et dans l'**Ouest-Américain** : **Utah** (*Bingham*), **Idaho** (*White Knob*) et surtout **Arizona** (*Clifton* et *Bisbee*). A While Knob, on trouve une cheminée éruptive, remplie de minerais et de silicates, au milieu de calcaires ; elle a l'aspect d'un tronc d'arbre avec ses branches.

Dans l'**Arizona**, à *Clifton*, les minerais de cuivre sont liés avec des monzonites, d'âge supra-crétacé ou éocène, qui traversent en les métamorphi-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

sant des terrains divers et notamment des calcaires ordoviciens et dinantiens recouverts par du Crétacé. Au contact des monzonites (intermédiaires entre les syénites et les diorites) et des calcaires, on a des gangues silicatées (grenat, épidote) renfermant de la pyrite, de la magnétite et des minerais sulfurés de cuivre et de zinc. D'autre part, un certain nombre de filons quartzeux pauvres, contenant de la pyrite, de la chalcopyrite sans magnétite, traversent les divers terrains et dérivent des monzonites cuprifères, de même que la pegmatite et le quartz dérivent des granulites ; on y remarque l'association, non pas de l'étain, mais d'un métal du même groupe, le molybdène. A *Bisbee*, les conditions sont à peu près analogues ; les phénomènes de remaniement y sont très développés en milieu calcaire : leurs dépôts ont incrusté de véritables grottes avec stalactites ou imprégné des lits d'argile ferrugineuse et manganésifère avec produits oxydés (cuprite, malachite, azurite) et cuivre natif. Une zone de cémentation a donné beaucoup de chalcosine. Enfin, ailleurs, l'altération secondaire a produit en surface le chapeau de fer habituel.

Les gîtes de contact se développent également au **Mexique**, dans la *Sonora* (Mine de *Cananea*) et dans la région de *Mazapil* (*Zacatecas*). Dans cette dernière région, exploitée d'abord pour l'argent et pour l'or, les gisements sont très analogues à ceux de l'Arizona. Ils sont en rapport avec des monzonites qui recoupent des calcaires jurassiques et crétacés. Ils contiennent de la pyrite cuivreuse, de la chalcopyrite, du cuivre gris avec gangue silicatée. Quelques-uns ont la forme de grands troncs, de cheminées, qui ont dû suivre des diaclases ou des plans de stratification.

VI. — FILONS CUIVREUX DE DÉPART ACIDE ASSOCIATION AVEC LE GROUPE STANNIFÈRE ET AVEC L'OR

Nous arrivons aux filons cuprifères proprement dits. Un premier groupe est dû à un départ acide. C'est un type de passage aux filons hydrothermaux. Il montre l'association avec l'étain ou avec les métaux et les minéraux du groupe stannifère (molybdène, bismuth, cobalt, tourmaline). L'or se développe parfois dans ces filons, formés de chalcopyrite avec gangue de quartz. La magnétite y est assez générale.

Quelques-uns de ces gisements ont été étudiés précédemment ; par exemple, au chapitre de l'étain, ceux de **Cornwall** (*Dolcoath*) en Angleterre, de **Saxe** et de **Bohême** (*Freiberg*, *Altenberg*, *Zinnwald*, *Marienberg*, etc.), du **Transvaal**, etc.

On en trouve également au **Tyrol**, dans le **Caucase**, au **Katanga** (Congo belge), au **Chili**, en **Bolivie**.

Les gisements du **Katanga**, signalés déjà par les premiers explorateurs du pays et étudiés à partir de 1891, comptent maintenant parmi les grands centres cuprifères du monde. On n'en connaît guère jusqu'ici que la forme d'altération superficielle qui semble se rapporter à un type filonien cupro-stannifère, également représenté dans la région par des filons d'étain. Les gîtes se trouvent pour la plupart dans un système plissé de grès, schistes, conglomérats et calcaires, d'âge indéterminé, peut-être silurien, avec localisation spéciale dans les calcaires et, par suite, trans-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

formation superficielle en produits oxydés. Tantôt ils prennent l'allure de filons-couches interstratifiés, tantôt ils coupent les terrains perpendiculairement. Le minerai pratique forme de petits amas, de minces couches discontinues, des enduits, des imprégnations de fissures ; c'est surtout un minerai oxydé à gangue siliceuse (malachite, azurite, chrysocolle).

Les teneurs ont été, jusqu'ici, remarquablement élevées, en moyenne 8 %, souvent 13 à 20 %, et la facilité de travailler en profondes carrières par excavateurs permet un prix de revient très bas. Les mines échelonnées autour d'*Elisabethville* et de *Kambove* sont celles de l'Etoile, Ruashi, Luushia, etc. De puissantes usines ont été créées à Lubumbashi, près Elisabethville. Depuis 1927, le prolongement des gisements belges dans les territoires anglais de la Rhodesia a donné naissance à la fonderie de Bwana-M'Kubwa.

Au **Chili**, la formation cuprifère est très développée et renfermait au début des minerais tenant jusqu'à 12 et 15 % de cuivre. La possibilité de faire venir du charbon de Patagonie a permis récemment d'exploiter jusqu'à 5 %. Les gisements se trouvent surtout dans une cordillère voisine de la côte ; ils sont en relation avec des syénites et sont associés avec de la tourmaline.

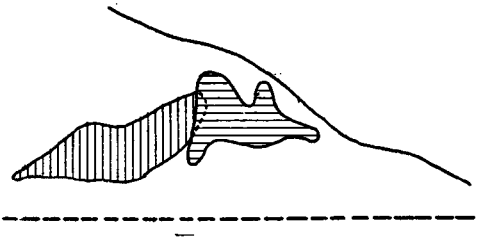


Fig. 118. — Coupe verticale des mines de la Prugne (Les deux amas ne sont pas sur le même plan ; ils ont été projetés sur le plan de la figure).

On y a exploité de la malachite, du chrysocolle, de la cuprite, du cuivre natif, etc.

En **Bolivie**, dans la grande Cordillère (5.000 mètres), on retrouve des mines de cuivre et d'étain (voir p. 186) souvent avec bismuth. Elles sont en relation avec des monzonites, des granulites et des roches microlithiques. On y a bien vu le passage d'un métal à l'autre suivant la zone exploitée. Les parties hautes sont généralement argentifères (par exemple au *Potosi*) et constituées par des cuivres gris argentifères, avec cuprite et carbonates. On n'exploite plus guère que **Huanchaca** où on a trouvé des métaux rares du groupe de l'étain : germanium, indium, etc... En profondeur, le minerai est assez pauvre.

Nous rapprocherons des gisements précédents les gîtes de La Prugne (Allier) et Boccheggiano (Toscane), où de faibles quantités d'étain s'associent au cuivre.

En France, à **La Prugne (Allier)**, on a exploité du cuivre pendant quelques années, vers 1875. On a là un bassin carbonifère isolé entre quatre failles (en relation avec les fractures du Forez) et formé surtout de schistes alternant avec des quartzites et des grès. Les schistes sont

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

recoupés par des filons de microgranulite et renferment un système filonien cuivreux, renflé en amas (fig. 118) ; on a dépilé deux grands amas cuprifères enveloppés dans une roche verte que l'on a assimilée aux serpentines de Monte-Catini et qui est simplement un agrégat de chlorite résultant de l'altération de schistes amphiboliques. Grâce à l'altération superficielle, la chalcopyrite s'accompagne d'érubescite. On a en tiré pour 1 million de minerais de cuivre et 500.000 francs d'argent ; puis la mine s'est épuisée et a été arrêtée. On y a noté la présence de l'étain. Cette mine a été un peu reprise sous le nom de *Charrier* en 1929 (cuivre et plomb argentifère).

En **Toscane**, on trouve un ensemble complexe de filons métallifères N.–S., suivant un réseau de failles par lequel a été disloquée toute la

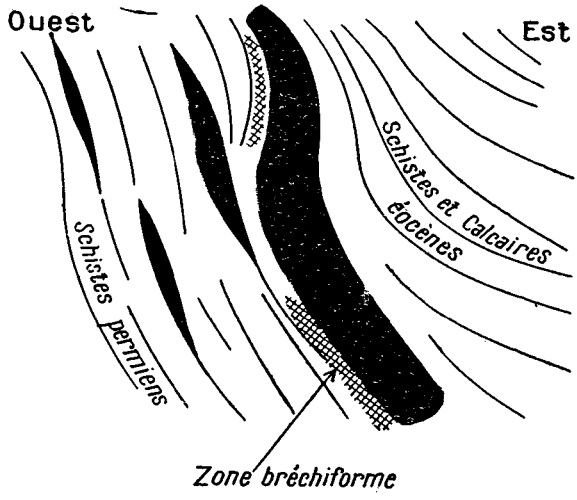


Fig. 119. — Coupe verticale du filon de Boccheggiano.

Toscane et qui fait apparaître des îlots, des horsts de Secondaire au milieu du Tertiaire. Le long des contacts, il y a eu des circulations métallifères, encore représentées aujourd'hui par des sources thermales et des venues d'acide borique. On a exploité de nombreux petits gisements de plomb (surtout au XIVe siècle). Le zinc n'y était pas représenté ; on n'a donc pas pu reprendre ces mines pour le zinc. Il existe ça et là des amas de pyrite de fer cuprifère. En particulier, à **Boccheggiano**, un important filon se présente comme le remplissage d'une grande faille de contact entre le Permien et le Rhétien à l'Ouest et l'Eocène à l'Est. Il a une allure presque interstratifiée (fig. 119). Non loin, les schistes permiens renferment aussi des lentilles cuivreuses. On ne trouve pas de roches éruptives au voisinage. Le minerai du filon est exclusivement de la pyrite avec chalcopyrite ; aux affleurements seulement, un peu de chalcosine. La pyrite est tantôt massive, tantôt pulvérulente, tantôt cristallisée en gros cubes. On y a trouvé un peu de bismuthine et des traces d'étain. Dans la même région, se trouve, d'ailleurs, le groupe stannifère de Campiglia

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Marittima. La gangue, surtout quartzeuse, renferme exceptionnellement de la barytine, mais pas de fluorine. La teneur moyenne en cuivre est de 3,20 %.

VII. — FILONS CUPRO-PLOMBIFÈRES A GANGUE QUARTZEUSE

Nous arrivons à des gîtes nettement filoniens, remplis de chalcopyrite à gangue de quartz, où apparaissent d'autres métaux sulfurés du groupe plombifère et pour lesquels le rapport avec la roche éruptive originelle est très lointain. Ils renferment, outre la chalcopyrite, de la pyrite, de la galène, de la blende et nécessitent donc un travail considérable de triage mécanique. Leur valeur est beaucoup moindre que celle des gisements précédemment étudiés.

En **Algérie**, les filons cupro-plombifères sont très nombreux, mais sans grande importance industrielle. Ils se succèdent depuis la frontière tunisienne jusqu'à la frontière marocaine, en diminuant de valeur vers l'Ouest. On en connaît dans la région de Bône, en Kabylie, dans les environs de Bougie, vers Miliana et Tenès. Ils ont été généralement exploités pour plomb par les anciens ; on les a repris récemment pour zinc ; puis, en s'approfondissant et en sortant des galeries anciennes, on a retrouvé du plomb. Le cuivre y apparaît souvent ; on avait fondé sur lui, au moment de la conquête, de grands espoirs qui ont été déçus.

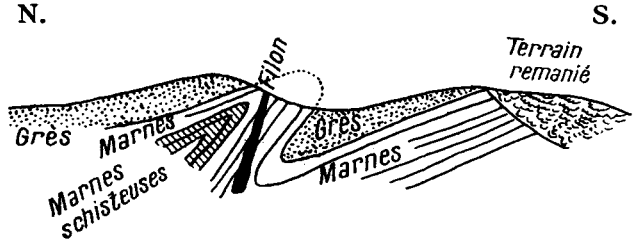


Fig. 120. — Coupe géologique de la région de Kef Oum-Théboul.

Un gisement relativement important a été exploité à *Kef Oum-Théboul*, à 12 kilomètres de La Calle, à l'Est de Bône. Le filon occupe une cassure le long d'un anticlinal faillé (fig. 120), composé de marnes schisteuses et de grès tertiaires. Il recoupe les schistes sous un angle assez faible. Les parties riches du filon présentent la forme de colonnes qui se rejoignent près des affleurements, donnant là une zone riche continue, depuis longtemps épuisée et qui a d'abord fait croire à une largeur énorme du filon. La gangue est surtout quartzeuse, avec barytine accidentelle et argile blanche. Le minerai brut est très complexe : il donne 70 % de minerai de fusion :

Galène	1 %
Pyrite cuivreuse riche (à 14 % de Cu et 900 gr. Ag)	1 %
Pyrite cuivreuse moins riche (à 4 % de Cu et 1.500 gr. Ag)	1,5 %

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Pyrite cuivreuse pauvre (à 2,5 % de Cu et 400 gr. Ag)	40 %
Blende galènifère	2 %
Complexes	37 %
Quartz, stériles, etc	17,5 %

La teneur en argent diminue rapidement en profondeur.

En *Australie*, à **Burra-Burra**, de beaux filons remplissent de grandes fractures avec pyrite cuivreuse, au milieu de calcaires métamorphiques. En surface, il y a un chapeau de fer ; plus bas, des enrichissements, donnant des minerais oxydés (cuprite, malachite, azurite) et du cuivre natif ; plus bas encore, de la chalcopyrite et de l'érubescite avec gangue quartzeuse. Le début de l'exploitation (1845-1877) a donné des minerais à 22 %. La largeur de ces filons est de 10 à 14 mètres.

Au *Mexique*, à **Boleo d'Inguaran** (Etat de Michoacan), il y a tout un système de filons complexes, reconnus par une société française, où le cuivre domine, mais où on trouve aussi la galène, la blende... Les filons sont en relation avec des andésites ou avec des diorites.

VIII. — FILONS, A GANGUES CARBONATÉES, DE CHALCOPYRITE OU DE CUIVRE GRIS

Les filons cuprifères peuvent présenter une gangue carbonatée. Nous avons vu, aux chapitres du fer et du nickel, tout un groupe de filons où la sidérose s'associe avec la chalcopyrite (**Allevard, Siegerland, Dobschau**) avec intervention parfois du nickel et du cobalt. Nous allons insister sur les gisements de cuivre gris, dans lesquels la gangue de sidérose ou de barytine est très constante.

Les filons de cuivre gris apparaissent comme caractéristiques des zones plissées tertiaires. Ce sont des veines éparpillées, irrégulières, se coinçant en profondeur, ayant l'allure de filons-couches, injectant des schistes ou des marnes, s'appauvrissant vers le bas. Le cuivre gris fait place en profondeur à la pyrite plus ou moins cuivreuse : il peut donc faire penser à une altération de la zone de cémentation, en milieu calcaire, de même que la sidérose peut provenir de l'altération de la pyrite au contact de calcaires. Cette sidérose se transforme aux affleurements en hématite. Néanmoins, la présence de l'antimoine, sous forme de cuivre gris, et l'apparition du mercure, à l'état de cinabre, semblent correspondre à des particularités originelles.

La zone de peroxydation offre des affleurements carbonatés à couleurs vives qui attirent l'attention (malachite, azurite) et qui passent, quand on s'enfonce, à du cuivre gris avec sidérose.

Les gîtes de cuivre gris s'épuisent très rapidement ; ils peuvent donner momentanément de bons résultats. La teneur en cuivre de leurs minerais peut être très élevée (30 à 40 %) ; en outre, le cuivre gris est souvent argentifère.

On trouve des filons de cuivre gris dans diverses chaînes tertiaires :

Sierra Nevada espagnole. — Ils y sont très nombreux et leur teneur en argent s'est élevée à 8 et même 10 kilogrammes par tonne de cuivre gris.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Pyrénées. — La mine d'*Alzen* dans l'*Ariège* a donné un moment des minerais enrichis de cémentation, argentifères et cuprifères, concentrés par poches. De petits gisements sans importance existent aussi dans l'*Hérault* et l'*Aude*.

Alpes (*Dauphiné, Tyrol*).

Algérie (*Petite Kabylie, Mouzaïa*).

IX. — GISEMENTS DE CUIVRE NATIF

Le cuivre natif apparaît fréquemment dans les produits d'altération superficielle, sur les affleurements des gîtes cuprifères. Mais il forme aussi, dans quelques cas, l'élément essentiel de la minéralisation et persiste, pour une cause mal démêlée, aux profondeurs extrêmes des travaux : 2.000 mètres au Lac Supérieur, 500 mètres à Corocoro. L'origine de ces deux gisements, malgré certaines apparences de stratification locale, paraît être épigénétique.

Gisements du Lac Supérieur. — Les exploitations remontent très loin ; mais elles ne se sont développées qu'à partir de 1850. Ce groupe minier a joué un rôle considérable sur le marché du cuivre ; bien que dépassé actuellement par d'autres mines, il a encore une grosse importance. La qualité y est supérieure, mais la teneur dans l'ensemble est assez faible (1,5 à 2 %).

La région du Lac Supérieur fait partie d'une grande plate-forme primitive. Il y a là une importante série de terrains plissés antécambriens, recouverte en discordance par du Cambrien horizontal. Les terrains plissés comprennent, depuis la base jusqu'au sommet, l'Archéen (série de Keewatin), l'Huronien, le Keweenawien, tous ces termes étant séparés entre eux par des discordances. Le tout forme une grande cuvette synclinale. Depuis l'époque cambrienne, il n'y a plus eu de mouvements de plissements importants, mais seulement quelques mouvements verticaux d'ensemble.

La série cuprifère se trouve dans le Keweenawien, constitué de grès, schistes, conglomérats et roches éruptives (mélaphyres, diabases, microgranulites, etc.). L'épaisseur de ces terrains est de 10.000 mètres ; il y a eu de nombreux remaniements ayant donné naissance à des conglomérats. Le cuivre natif apparaît dans cette série, toujours en relation avec les roches basiques vacuolaires ou altérées, jamais avec les roches acides. Il affecte plusieurs formes principales, suivant les terrains où on le rencontre :

1° *Conglomérats cuprifères*, à galets stériles de microgranulite ou de diabase, dans le ciment desquels se trouve le cuivre à l'état de petits grains ou de petits noyaux (quelquefois plusieurs tonnes) ;

2° *Diabases avec amygdales de cuivre.* — Ce type existe uniquement en amygdales dans les vacuoles de la roche, avec calcite, zéolithes, épidote. Les grains de cuivre natif sont, tantôt isolés les uns des autres dans la pâte de mélaphyre, tantôt réunis par des cordons de manière à former comme des grappes de raisin ;

3° *Diabases altérées.* — Les minéraux primitifs ont été remplacés par de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

l'épidote. Il en résulte des épigénies ; celles-ci sont cuprifères. Il y a association d'argent natif.

4° *Filons.* — Un certain nombre de fractures verticales sont remplies par des plaques de cuivre qui ont cristallisé, avec quartz, calcite, zéolithes, argent natif.

En résumé, il y a eu des remaniements évidents et des concentrations aquifères : là où il se trouve, le cuivre est venu se rassembler postérieurement aux dépôts des sédiments keweenawiens.

Les Américains admettent généralement qu'il est dû à une sécrétion latérale. Les diabases et les mélaphyres de la région contiennent, en effet, des traces de cuivre et de la magnétite qui aurait joué un rôle réducteur. Il est plus probable qu'il s'est agi, au début, d'une imprégnation, à peu près contemporaine de la sédimentation, due à des phénomènes de départ dans les roches éruptives, d'âge précambrien, qui accompagnent ces dépôts sédimentaires. On retrouvera peut-être un jour ces gîtes de départ à l'état originel. Il est possible, d'ailleurs, que tout ce que l'on voit soit le résultat d'altérations superficielles, dues à des eaux venant de la surface, à une époque très ancienne, cambrienne ou silurienne, avec effondrement ultérieur de toute la zone altérée, préservée ainsi contre l'érosion.

Gisement de Corocoro (Bolivie). — Sur le haut plateau bolivien, compris entre les deux cordillères Est et Ouest, sont répartis toute une série de gisements cuivreux dans un épais système de grès rouges, probablement crétacés, avec intercalations de gypse, sel et, vers la base, bancs de porphyrite. Leur origine a des chances pour être filonienne. Le plus célèbre est *Corocoro*, exploité depuis 1832 et situé sur un anticlinal rompu. Les minerais, peut-être en rapport avec la dislocation, forment, soit des bancs (0 m. 50 à 2 mètres) dans les grès grossiers non argileux, soit de minces délits dans les grès fins argileux. Le rendement des minerais traités est de 2,8 %.

C'est du cuivre natif en feuilles, plaques, fils, arborescences, accompagné d'un peu d'argent natif, de calcite, de malachite, de cuprite, d'azurite et de domeykite (arséniure de cuivre). La présence du gypse semble indiquer une action des sulfates métalliques sur des calcaires. En profondeur, il est probable qu'on rencontrera des minerais sulfurés.

X. — GISEMENTS A ALLURE SÉDIMENTAIRE

Ce sont des gisements intercalés au milieu de strates sédimentaires de *grès, schistes* ou *calcaires* et prenant, parmi celles-ci, une allure stratiforme. Leur origine, très discutée, est souvent probl matique. Les uns paraissent nettement épigénétiques (par exemple ceux qui sont dans les calcaires), Les autres, au contraire, semblent s'être fo més en même temps que les sédiments.

a) GRÈS, CONGLOMÉRATS ET SCHISTES CUPRIFÈRES. — α) Dans le **Précambrien** (*Keweenawien*), on peut citer les conglomérats cuprifères du *Lac Supérieur* qui viennent d'être étudiés.

β) Dans la **Chaîne hercynienne** existe, en Europe, depuis le Sud de l'Espagne jusqu'à l'Oural, une zone de sédiments métallifères, originellement sulfurés, d'âge *permo-triasique*, renfermant surtout du fer et du

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

cuivre et une petite quantité de plomb. Ces sulfures imprègnent le plus souvent des grès et conglomérats, rarement des schistes et argiles. Il y a une certaine relation entre le développement des minerais dans les grès et la présence des mêmes métaux dans les filons des massifs primaires voisins : ces grès métallifères semblent donc provenir de la destruction de filons, eux-mêmes en relation avec les montées éruptives de la fin du Carbonifère et du début du Permien. Les sédiments cuprifères présentent une association constante avec des matières organiques qui ont pu déterminer la précipitation du cuivre par réduction ; de là, de fines imprégnations hydrocarburées bitumineuses, des pseudomorphoses de poissons, de plantes, de troncs ligneux, en chalcopyrite, érubescite, etc. Parfois le cuivre se trouve en nodules (cuivre natif et carbonates) disséminés au milieu du grès. Ces gisements cuprifères stratiformes du Permo-Trias se rencontrent dans le *Sud-Est de l'Espagne*, à *Minorque*, dans le *Sud de la France* (*Cap Garonne* (*Var*) et *Alpes-Maritimes*), en *Prusse rhénane*, dans la *Hesse*, dans le *Nassau*, en bordure du *Hartz* (*Mansfeld*) et de la *Forêt de Thuringe*, en *Bohême*, en *Silésie*, dans l'*Oural* (région de *Perm*).

A **Minorque** (*Espagne*), il y a un charbon cuprifère, constitué par des alternances de lignites et de filonnets de chalcosine ou de chalcopyrite.

Dans le gouvernement de **Perm**, on trouve des troncs d'arbres entièrement transformés en cuivre.

Les gisements du **Mansfeld** peuvent être rapportés au même groupe,

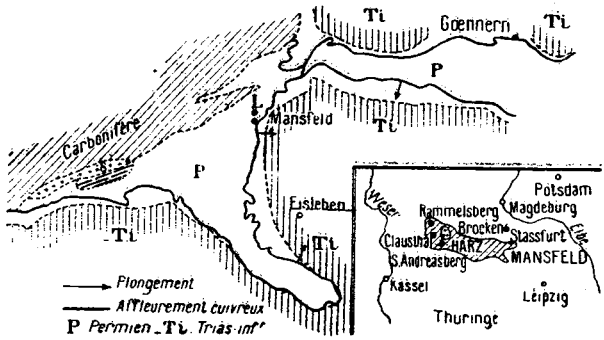


Fig. 121-122. — Carte des gisements du Mansfeld (Unterharz, Allemagne).

mais en les mettant à part, car ils donnent lieu à une importante industrie. Très anciennement exploités, ils fournissent 15 à 20.000 tonnes de Cu et 60 tonnes d'argent par an et ont réussi à doubler leur production pendant la guerre. Ce sont des gisements de schistes cuprifères à allure nettement sédimentaire, intercalés dans le Zechstein (Permien Supérieur). Celui-ci forme, à l'Est de Mansfeld, une cuvette synclinale de 18 kilomètres de large. Il correspond, comme tout le Permien, à une phase de dénudation et d'érosion des terrains primaires plissés. Il repose sur le Rothliegende (grès et conglomérats grossiers de 1.000 à 2.000 mètres d'épaisseur avec coloration rouge due à une remise en mouvement du fer), analogue au Keweenawien du Lac Supérieur. Ce Rothliegende (Permien moyen) repose lui-même en discordance sur le Carbonifère plissé et se termine au sommet

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

par une mince couche (1 mètre à 2 mètres) de Weissliegende (grès grisâtre à ciment calcaire), déjà un peu cuprifère.

La formation cuprifère vient juste au-dessus du Weissliegende. Elle consiste en une assise de schistes bitumineux, avec fossiles (plantes, poissons, mollusques), d'une épaisseur de 0 m. 50, dans laquelle s'intercalent de très minces niveaux cuprifères dont l'épaisseur totale est d'à peu près 10 centimètres. Au toit se trouvent un banc de calcaire marneux, le Dachklotz, renfermant encore quelques mouches cuivreuses, puis des formations lagunaires avec produits d'évaporation (gypse, sel gemme; sels de potasse à Stassfurt).

Les minerais consistent surtout en chalcopyrite et, accessoirement, en érubescite, cuivre gris, chalcosine. Les parties les plus riches se rencontrent au voisinage du massif primaire du Hartz : c'est de lui que provient vraisemblablement le cuivre. Il y a, en outre, association assez fréquente avec la pyrite, la galène, plus rarement la blende, le nickel et le cobalt. Ces derniers métaux, nickel et cobalt, sont concentrés le long de fractures transversales. On a soutenu que tous les minerais étaient montés par ces failles : cette hypothèse paraît bien peu probable, étant donné l'homogénéité et la continuité de la métallisation.

En dehors d'Europe, les grès cuprifères permo-triasiques se retrouvent aux **Etats-Unis** (*New-Jersey*, *Texas*, *Nouveau-Mexique*, *Arizona*).

γ) Nous arrivons à des gisements de grès cuprifères **crétacés et tertiaires.**

Nous avons déjà signalé, avec les gisements de cuivre natif, les grès crétacés de **Corocoro** (*Bolivie*), imprégnés de cuivre natif et de minerais oxydés, que nous croyons plutôt d'origine filonienne.

Gisement du Boléo (*Basse- Californie*). — Ce gisement mexicain, exploité par une société française, est un gîte à allure sédimentaire qui peut résulter d'une pénétration ultérieure dans des formations tertiaires. La région, très désertique, est formée d'un vaste plateau presque horizontal, surmonté par quelques pitons trachytiques et constitué par des alternances de tufs, de grès calcaires, de conglomérats. Au milieu de ces strates sont intercalées cinq couches de minerais cuivreux associés à du gypse d'origine secondaire et à du manganèse, succédant aux bancs de conglomérats. Au début de l'exploitation, on a observé un grand développement de produits très altérés, oxydés (azurite, malachite, atacamite, chrysocolle, cuprite, mélaconise), répartis dans une gangue argileuse ; l'azurite prend localement une disposition en boules concrétionnées (boléos) ; comme raretés minéralogiques, il y a de la *boléite* (oxychlorure de Pb, Cu et Ag), de la *cumengéite* (oxychlorure de Pb et Cu). En profondeur, la proportion des minerais sulfurés augmente, de même que la teneur en silice ; il y a un peu de cobalt. La formation du gisement semble être en rapport avec la présence d'inclusions cuprifères dans les trachytes. La production annuelle est de 10.000 à 12.000 tonnes de métal pur.

b) Calcaires cuprifères. — Dans l'**Oural**, de nombreux gisements de cuivre, déjà signalés, ont pris une allure spéciale du fait de leurs rapports avec des calcaires.

Au **Congo français**, entre Mindouli et Brazzaville, les mines du **Niari** montrent des minerais cuprifères, au milieu de calcaires magnésiens rat-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

tachés au Dévonien. En surface, il s'agit de produits oxydés (oxyde noir, malachite, dioptase) avec argent natif et cérusite. Le gîte profond semble être formé de chalcopyrite, galène, pyrite et blende.

Au **Transvaal**, à **Malmani**, la métallisation est dispersée dans les fissures d'une zone calcaire, qui arrive, du fait des altérations, à prendre l'apparence d'un calcaire métallisé.

En **France**, à **Chessy** (*Rhône*), dans le prolongement du gisement pyriteux de Sain-Bel, le minerai forme des poches, au milieu du calcaire, remplies d'argile avec du cuivre natif et de la chessylite (azurite) (Voir chapitre du Soufre).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXV

ZINC ET PLOMB

Ces deux métaux seront décrits ensemble ; car il est presque impossible de les séparer au point de vue de la description géologique, un très grand nombre de mines contenant les deux métaux et n'étant réputées mines de zinc ou mines de plomb que parce que l'un ou l'autre de ces métaux prédomine. Leur groupement est extrêmement intime. Mais nous commencerons par indiquer séparément leurs usages, leur statistique, leurs conditions particulières de gisement.

A. — ZINC

1. Usages. — Le zinc métallique ne semble pas avoir été connu de l'antiquité, quoiqu'on ait su, à l'époque romaine, fabriquer directement des alliages de zinc et de cuivre, en partant de la calamine.

C'est au XIII^e^ siècle qu'on commence à faire mention de ce métal ; mais, jusqu'au XVIII^e^ siècle, il était uniquement importé de Chine. L'industrie du zinc ne prit naissance en Europe qu'à la fin du XVIII^e^ siècle (en Angleterre et en Silésie) ; mais elle se développa rapidement au XIX^e^ siècle. Toutefois, encore maintenant, les procédés de traitement ont une allure souvent archaïque : ils font perdre une grande partie du métal et dépendent pour beaucoup de l'habileté des ouvriers.

Les principaux usages du zinc sont fondés sur les propriétés suivantes : 1° son peu d'altérabilité à l'air ; 2° la possibilité de le réduire en feuilles très minces (1/4, 1/5 de millimètre par exemple). Aussi on s'en sert, en enduits galvaniques ou en feuilles, pour la couverture des toits, les gouttières, la fabrication des ustensiles domestiques.

En outre, le zinc entre dans la composition de certains alliages (bronzes, maillechort) ; il est utilisé pour les piles, la désargentation du plomb, l'impression zincographique, l'imitation de bronzes d'art ; il sert dans les laboratoires.

L'oxyde de zinc (blanc de zinc) tend à remplacer la céruse dans l'industrie des couleurs : il est moins recouvrant, mais ne noircit pas par les émanations sulfurées et n'est pas vénéneux ; on le mélange avec de la barytine.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Le chlorure de zinc est employé comme antiseptique et désinfectant.

2. Statistique. — Les statistiques nous renseignent mal sur la répartition géologique et minière du zinc dans le monde ; elles nous donnent, soit la production par pays du zinc métal, qui dépend beaucoup des importations et des exportations de minerais, soit la production brute des minerais qu'on ne peut pas comparer entre eux parce qu'ils sont de teneurs inégales.

Cette réserve faite, voici les chiffres de la production du zinc métal. La production mondiale dans l'ensemble est croissante. Partie de 465.000 tonnes en 1900, elle a atteint 817.000 tonnes en 1910, 1.000.000 de tonnes en 1913, elle a fléchi un peu dans les années qui ont suivi la guerre (706.000 tonnes en 1919), mais a repris sa progression jusqu'en 1930 : 1.020.000 tonnes en 1924, 1.470.000 tonnes en 1929, 1.413.000 tonnes en 1930.

Elle se répartit ainsi par pays producteurs et par ordre d'importance (en 1929 et en 1930) :

Etats-Unis : 573.000 tonnes en 1929 ; 458.000 tonnes en 1930 (313.000 tonnes en 1913). Les minerais proviennent du Missouri et du Kansas, où la métallurgie est favorisée par la présence de gisements de pétrole, et, accessoirement, du Colorado et du New-Jersey.

Belgique : 198.000 tonnes en 1929 ; 178.000 tonnes en 1930 (197.000 tonnes en 1913). Production croissante, malgré l'interruption due à la guerre. Actuellement, la Belgique n'a plus de minerais et tire ce zinc de minerais importés.

Pologne : 169.000 tonnes en 1929 ; 174.000 tonnes en 1930. Production croissante (85.000 tonnes en 1922). Minerais de Haute-Silésie.

Canada : 78.000 tonnes en 1929 ; 110.000 tonnes en 1930. Production croissant rapidement (25.000 tonnes en 1922).

Allemagne : 102.000 tonnes en 1929 ; 97.000 tonnes en 1930. Production qui a beaucoup baissé depuis la guerre par suite de la perte de la Haute-Silésie : 280.000 tonnes en 1913. Minerais indigènes de la région rhénane, de la Silésie et minerais importés.

France : 92.000 tonnes en 1929 ; 91.000 tonnes en 1930 (64.000 tonnes en 1913). Production croissante, provenant de minerais nationaux et de minerais importés.

A l'heure actuelle, la France est capable de produire à peu près tout le zinc qui lui est nécessaire avec ses minerais propres [Les Malines, La Croix de Pallières, Saint-Sauveur des Pourcils dans le Gard ; Les Bormettes et La Londe dans le Var ; Planioles dans le Lot ; Le Bleymard dans la Lozère ; Labarre et Corbières dans l'Hérault ; Pierrefitte, Arrens, Chèze, dans les Hautes-Pyrénées ; Saint-Lary dans l'Ariège] et ceux d'Algérie et de Tunisie.

Tasmanie et Australie : 50.800 tonnes en 1929 ; 56.000 tonnes en 1930.

Grande-Bretagne : 59.000 tonnes en 1929 ; 49.000 tonnes en 1930 (63.000 en 1910, 18.600 tonnes en 1922, 39.000 tonnes en 1924, 18.000 tonnes en 1926). La Grande-Bretagne importe beaucoup de minerais ; elle a quelques gisements zincifères dans le Pays-de-Galles, le Cumberland, la Chaîne Pennine et l'île de Man. Il existe un grand centre de traitement à Swansea.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Mexique : 27.000 tonnes en 1929 ; 37.000 tonnes en 1930.

Hollande : 26.000 tonnes en 1929 ; 23.000 en 1930. — Minerais uniquement importés.

Japon : 20.000 en 1929 et 22.000 en 1930.

Italie: 16.000 tonnes en 1929 ; 19.000 tonnes en 1930. L'Italie (Sardaigne) est un centre important de production de minerais.

Rhodésia : 12.000 tonnes en 1929 ; 18.000 tonnes en 1930.

Tchécoslovaquie : 11.000 tonnes en 1929 ; 13.000 tonnes en 1930.

Espagne : 12.000 tonnes en 1929 ; 11.000 tonnes en 1930. Il existe deux centres miniers : région de Santander et région de Carthagène.

3. Commerce des minerais. — Le traitement des minerais de zinc a été longtemps localisé dans trois centres : Silésie, Liége et Prusse rhénane, Swansea ; à l'heure actuelle, le nombre des régions qui traitent le zinc est encore très restreint. Ce fait tient à deux causes : *a*) la métallurgie du zinc exige une habileté toute spéciale des ouvriers, des tours de main traditionnels, donc un personnel très exercé, adapté aux conditions particulières d'un minerai déterminé ; cette cause tend à disparaître devant l'application de procédés électrolytiques ; *b*) d'autre part, rien ne s'oppose à l'exportation des minerais : ceux-ci (calamines), généralement riches (40-50 %), supportent aisément les frais de transport.

Les minerais commerciaux sont la blende et la calamine.

Les prix d'achat sont réglés par des formules telles que :

$V = P\ (T - 7) - F$ (pour les calamines) ;

$V = 0{,}95\ P\ (T - 8) - F$ (pour les blendes) ;

P = le prix des 100 kilogrammes de zinc brut au cours du jour et dans le mois de la livraison ; T = Teneur à l'analyse ; les chiffres 7 et 8 représentent la perte au traitement ; F = Frais de transport et de traitement ; le coefficient 0,95 pour la blende est destiné à compenser la perte au grillage.

Les cours moyens du zinc ont été (en francs-or) : 1913, 565 francs ; 1916, 1862 ; 1920, 1.110 ; 1921, 640 ; 1925, 907 ; 1928, 630 ; en avril 1932, 320. A la dernière date, la tonne de blende à 40-45 % zinc vaut 250 francs réduits CIF Marseille et la tonne de calamine à 40 % de zinc 270 francs réduits.

4. Minerais. — Le zinc existe dans la nature sous deux formes principales :

a) La *blende*, en fait le seul minerai originel de zinc. Elle n'est pas composée que de sulfure de zinc : elle retient en outre, à l'état de traces, beaucoup d'autres éléments (comme le fer) qui représentent le milieu dans lequel elle a cristallisé. Elle a l'inconvénient d'exiger un grillage préalable très soigné.

b) La *calamine* qui, dans le langage industriel, désigne à la fois le carbonate de zinc (*smithsonite*) et l'hydrosilicate (*calamine* minéralogique). La calamine terreuse ou *zinconise* ou hydrozincite est un hydrocarbonate.

Citons encore : La *franklinite* (spinelle de fer, zinc et manganèse) et la *zincite* (ZnO).

5. Rôle géologique du zinc. — Pour le zinc, comme pour les métaux qui

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

vont suivre, les gisements d'inclusion, de ségrégation, de contact même, n'ont plus guère qu'un intérêt théorique et nous rencontrons *presque exclusivement des filons concrétionnés hydrothermaux* qui peuvent, d'ailleurs, prendre les formes les plus diverses suivant la nature du terrain encaissant, l'origine du vide incrusté, etc.

Dans la majeure partie des cas, le zinc est, je l'ai dit, si intimement associé au plomb qu'on ne peut guère séparer l'étude des gisements de ces deux métaux. Toutefois le zinc diffère du plomb par certains caractères profonds et superficiels de ses gisements.

D'abord le zinc domine de beaucoup dans les gîtes de profondeur plus ou moins directement associés au granite ; il s'y accompagne souvent du groupe de l'étain (étain, bismuth, molybdène) et du cuivre. Par contre, lorsque la métallisation prend l'allure de filons plus nettement concrétionnés et se rapproche de la superficie, c'est le plomb qui l'emporte sur le zinc. Celui-ci représente donc un type un peu plus profond que le plomb.

D'autre part, les sels de zinc étant plus solubles que les sels de plomb, le zinc se transforme en carbonate beaucoup plus facilement que le plomb. Dans les phénomènes d'altération en milieu calcaire, le zinc a tendance à se concentrer à la surface pour former des amas de calamine, tandis que le plomb ne donne que de rares gisements de cérusite ou d'anglésite.

Dans la plupart des mines plombo-zincifères, reconnues depuis longtemps, on s'est trouvé, jusqu'à une profondeur de 100 mètres, en présence des travaux des Anciens qui avaient exploité la galène et laissé subsister la calamine qu'ils ne connaissaient pas ; puis on est arrivé en profondeur à un niveau où la blende a remplacé la calamine et s'est ajoutée à la galène.

B. — PLOMB

1. Usages. — Le plomb, connu depuis la plus haute antiquité, est utilisé, soit sous forme de plomb métallique, soit à l'état de composés divers : oxyde, sulfate, carbonate.

Les usages du *plomb métallique* sont fondés sur quelques propriétés principales : il est facilement laminable, tendre, sans élasticité, très dense (11, 35), inattaquable à un grand nombre d'acides (de là son emploi dans la fabrication de SO^4H^2 : Chambres de plomb), fusible à basse température vers 330°, souple, etc.

On l'emploie en feuilles pour les couvertures de toits ; mais on lui préfère le zinc, car il est trop lourd et sa fusibilité constitue un danger en cas d'incendie. On en fait des tuyaux pour conduites d'eau ou de gaz : ces tuyaux ont l'avantage de se plier à la main sans effort ; mais le plomb, très altérable à l'eau pure (et presque pas à l'eau chargée de CO^3Ca), peut donner des sels nocifs. Il sert aussi dans la fabrication des balles, du plomb de chasse, des plaques pour électrodes et accumulateurs. Avec l'antimoine, il donne un alliage pour les caractères d'imprimerie.

Les *composés du plomb* sont utilisés dans la composition de matières colorantes : minium, céruse, chromate, sulfate. Le minium fournit en outre

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

un mastic pour luter les orifices des machines à vapeur ; il sert dans la fabrication du cristal.

2. Statistique. — Si on met à part les années qui ont suivi immédiatement la fin de la guerre (1919 à 1922) et qui représentent une période de fléchissement de la production minière, on s'aperçoit que la production mondiale du plomb-métal croît d'une manière continue :

1880	303.000	tonnes
1890	650.000	»
1900	849.000	»
1910	1.093.000	»
1913	1.163.000	»
1920	908.000	»
1923	1.218.000	»
1925	1.549.000	»
1928	1.675.000	»
1929	1.755.000	»
1930	1.664.000	»

Ce total se répartit ainsi par ordre d'importance en 1929 et 1930 :

	1930	1929	Divers
	tonnes	tonnes	
Etats-Unis	538.000	624.000	396.000 en 1913 ; 638.000 en 1926 ; 590.000 en 1928.
Mexique	252.000	249.000	120.000 en 1910 ; 20.000 en 1916.
Australie	167.000	177.000	110.000 en 1913 ; 6.000 en 1920.
Canada	151.000	144.000	17.000 en 1913 ; 16.000 en 1920 ; 154.000 en 1928.
Espagne	122.000	123.000	200.000 en 1913 ; 120.000 en 1922 ; 147.000 en 1926.
Allemagne	111.000	98.000	181.000 en 1913 ; 49.000 en 1923 ; 123.000 en 1928.
Birmanie	81.000	82.000	6.000 en 1913.
Belgique	63.000	62.000	41.000 en 1910 ; 4.000 en 1920 ; 65.000 en 1928.
Italie	24.000	23.000	22.000 en 1913 ; 11.000 en 1922 ; 24.000 en 1925.
France	21.000	20.500	20.000 en 1910 ; 13.000 en 1922 ; 25.000 en 1927.
Grande-Bretagne	10.000	11.000	31.000 en 1910 ; 5.000 en 1922 ; 4.000 en 1926.
Grèce	7.300	8.500	
Autriche	7.000	6.500	
Japon	3.000	3.400	
Rhodésia		2.000	21.000 tonnes en 1922.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Aux **États-Unis,** les principaux producteurs sont les suivants :

	1930	1929	Divers
	tonnes	tonnes	
Missouri	182.000	191.000	également gros producteur de zinc.
Idaho	123.000	134.000	Cœur d'Alène.
Utah	111.000	142.000	Bingham.
Oklahoma et Kansas..	42.000	65.000	
Colorado	23.000	21.000	Leadville.
Montana	14.000	24.000	

La production **mexicaine** est en progression.

Au **Canada,** le minerai provient des districts de l'Ouest (*Colombie britannique*) ; la production est en progression très rapide.

Au compte de l'**Espagne,** il faudrait ajouter les importantes quantités de galène qu'elle exporte. La diminution marquée de la production semble dénoter des signes d'épuisement en profondeur. Les deux groupes dominants sont *Linarès-la-Carolina* (prov. de Jaen) et *Peñarroya* ; celui de *Carthagène* a une production moindre.

L'**Allemagne** importe une bonne partie des minerais qu'elle traite. Sa production a beaucoup baissé par suite de la perte de la Haute-Silésie. Les principaux centres producteurs sont le *Hartz*, la *Prusse rhénane*, la *Silésie*.

La **Belgique** traite uniquement des minerais importés.

En **Italie,** le principal district minier se trouve en *Sardaigne*.

La plupart des mines de plomb de la **France** continentale sont fermées actuellement ; mais les mines de plomb et de zinc d'**Algérie** prennent un sérieux développement.

Dans l'ensemble, l'Amérique du Nord est, de tous les continents, celui qui produit la plus grosse quantité de plomb métallique : plus de 1.000.000 de tonnes en 1929.

3. Commerce. — Le marché du plomb est dans quelque mesure solidaire du marché de l'argent, un grand nombre de minerais de plomb renfermant en moyenne 800 à 1.000 grammes d'argent à la tonne et étant exploités en même temps pour l'argent connexe. La hausse de l'argent peut ainsi amener l'exploitation de certaines mines de plomb et, par suite, une surproduction de ce métal, déterminant l'affaissement de ses cours. Par contre, si l'argent est peu demandé, le cours du plomb a tendance à s'élever. Il est curieux de constater que les habitudes de thésaurisation de l'Inde, qui, après un temps favorable et une bonne récolte, déterminent une forte demande en argent, exercent une répercussion sur les mines de plomb de nos pays européens.

Les conditions de vente des minerais de plomb sont un peu différentes suivant les pays. En France et en Belgique, comme en Espagne, on prend pour base la teneur à l'essai, diminuée de 6 à 10 unités suivant la nature du minerai et suivant la quantité d'arsenic contenue. Les unités restantes sont payées au cours du plomb doux à Londres, Paris, Marseille ou Car-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

thagène, suivant convention, en déduisant 60 à 80 francs-or de frais de fusion par tonne (prix d'avant-guerre). Quant à l'argent renfermé dans le minerai, il est payé au cours en défalquant 55 à 60 francs (d'avant-guerre) pour frais de désargentation par tonne de plomb payée.

Un minerai de plomb à 65 % et 800 grammes d'argent vaudra :

$$\left[(65 - 7) \times \frac{30}{10} - 70\right] + \left[0{,}8 \times 92 - \frac{55(65 - 7)}{100}\right].$$

si on suppose le cours du plomb de 30 francs les 100 kilogrammes et celui de l'argent de 92 francs le kilogramme.

Cours du plomb. — Le plomb, qui valait 500 francs la tonne vers 1868, 280 en 1885, 475 en 1906, 400 en 1912, 457 en 1913, est monté à 750 en 1918. Depuis la guerre, les prix moyens ont été (en francs-or) de 950 en 1920, 900 en 1925, 775 en 1926, 610 en 1927, 530 en 1928, 380 en mars 1932, 320 en avril 1932 (160 francs réduits les 100 kilogrammes). En mars 1932, on vend la tonne de galène à 50 %, 570 francs réduits et 620 francs la tonne à 60 %.

4. Evaluation de la valeur d'un filon de plomb. — L'évaluation de la valeur d'un filon comprend :

a) L'appréciation de l'*épaisseur réduite* du filon ou de sa valeur par mètre carré de surface, ainsi que de sa longueur ;

b) L'estimation de sa *teneur* en plomb et en argent qui dépend, dans une certaine mesure, de la préparation mécanique ;

c) Le devis des dépenses d'exploitation.

L'*épaisseur réduite* du filon, c'est l'épaisseur d'un filon idéal qui serait formé de toutes les veines métalliques du premier filon, rapprochées et juxtaposées sans interposition de stériles. On peut l'obtenir, dans les filons à structure nettement rubanée, en additionnant les épaisseurs de toutes les veines métalliques comprises dans la largeur du filon ; mais, dans les filons où les minerais sont irrégulièrement distribués, il est nécessaire de procéder à l'exploitation sur un ou plusieurs mètres d'avancement, d'évaluer le cube du minerai ainsi abattu après préparation mécanique et d'en tirer l'épaisseur réduite par le calcul. En France, quand un filon a de 7 à 10 centimètres d'épaisseur réduite, il commence à couvrir les frais d'exploitation. En pratique, comme l'épaisseur réduite peut être sujette à variations, on calcule la moyenne des épaisseurs réduites prises tous les 20 mètres.

Il faut tenir compte en outre des *pertes d'exploitation et de lavage*, très variables suivant la nature du minerai et les procédés de préparation mécanique. On n'enrichit ordinairement pas le minerai jusqu'à obtenir de la galène théorique à 86, 6 % de plomb. Quelle que soit la substance à laver, il est évident qu'il y a lieu de continuer à enrichir un minerai ou à en séparer le stérile, tant que les frais de préparation, augmentés de la perte de minerais ténus au lavage, ne surpassent pas l'augmentation de valeur qui en résulte. Suivant la nature de la gangue, la préparation est plus ou moins facile ; elle dépend beaucoup des poids spécifiques des substances à séparer : quartz 2, 6 ; calcite 2, 7 ; dolomie 2,9 ; fluorine 3, 2 ; sidérose 3,85 ; blende 4 ; chalcopyrite 4,2 ; barytine 4,7 ; oligiste et magné-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

tite 5 ; mispickel 6 ; bournonite 6 ; galène 7,5. La galène à gangue de quartz ou de calcite pourra être généralement poussée jusqu'à 78 ou 80 % de sulfure ; mais, si elle est argentifère, les minerais d'argent très ténus auront beaucoup de chance d'être éliminés très vite au lavage. Pour arriver à 75 % de sulfure, on a calculé à Pontpéan qu'on perdait jusqu'à 30 % de plomb et 50 à 60 % d'argent ; au contraire, en n'enrichissant qu'à 50 % de plomb, la perte en argent se réduisait à 30 %. Dans ces conditions, on a intérêt à ne pas pousser trop loin la préparation mécanique.

5. Minerais de plomb. — Le seul minerai important est la *galène* (Pb S) qui contient théoriquement 86,6 % de Pb. Elle est plus ou moins argentifère. On admet communément que les galènes à petits cristaux sont plus argentifères que celles à grandes cristallisations. Il semble également que la richesse en argent soit en relation avec la présence d'une roche encaissante calcaire ou contenant des pyrites susceptibles d'avoir agi pour la précipitation de l'argent. La teneur de la galène en argent atteint 1.500 grammes à la tonne dans les minerais originels et profonds ; elle s'accroît jusqu'à 8 et 10 kilogrammes dans les minerais de la zone de cémentation. La galène est souvent antimonieuse et, en la traitant, on obtient directement du plomb antimonieux qui a des emplois spéciaux.

Parmi les autres minerais, citons la *cérusite* (CO^3Pb) qui tient 77,6 % de Pb, moins riche en argent que la galène dont elle provient. Elle constitue parfois de grands gisements (Leadville).

Très accessoirement on peut ajouter :

l'*anglésite* (SO^4Pb), la *pyromorphite* ($(PO^4)^3Cl\,Pb^5$), la *wulfénite* ($Pb\,O\,Mo\,O^3$), la *mimétèse* ($Pb^5As^3O^{12}Cl$), etc., ainsi que des antimoniosulfures : *boulangérite*, *bournonite* (avec Cu), etc.

C. — ÉTUDE DES GISEMENTS PLOMBO-ZINCIFÈRES

I. — INCLUSIONS, SÉGRÉGATIONS, GITES DE CONTACT

a) Le zinc et le plomb existent, disséminés, à l'état de traces résiduelles, dans un grand nombre de roches cristallines (granites, porphyres) ; ils n'y jouent qu'un rôle théorique.

b) Très mobiles à l'état de sulfures et de chlorures, ils ont été facilement déplacés et ils commencent à se séparer du magma originel et à se rencontrer dans l'*auréole de métamorphisme des granites et granulites* ; mais, dans ces gisements, le zinc l'emporte sur le plomb. On voit alors la blende et parfois la galène intervenir accessoirement dans certains filons d'étain, formant une transition progressive aux véritables filons plombifères. Ainsi dans le **Cornwall**, à la **Villeder** (*Morbihan*), dans l'**Erzgebirge** (*Saxe*).

c) Le zinc et le plomb se rencontrent aussi *dans les auréoles de métamorphisme des syénites et des diorites* en terrain calcaire. Ils y concourent à la constitution des *gisements de contact du type Banat*, où ils sont subordonnés au groupement principal : magnétite et chalcopyrite. Toutefois, ils prennent la prédominance dans les gisements suivants du même type :

Balia Maden (*Asie Mineure*). — L'agent de la métallisation a été une

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

andésite augitique qui traverse le calcaire carbonifère. Au contact de la roche éruptive et du calcaire s'est développée une gangue de silicates (grenat, augite, épidote), au milieu de laquelle ont cristallisé des sulfures métalliques. Ceux-ci forment des nids, des amas, au voisinage du contact, soit dans le calcaire, soit dans l'andésite. On connaît un de ces nids de galène de 26 mètres de long. Les minerais primitifs sont de la galène et de la pyrite dominantes, de la blende, un peu de chalcopyrite, du mispickel et du cuivre gris. Les altérations postérieures ont donné de la calamine, de la cérusite, de l'oxyde de fer et des kaolins. En outre, près du gisement, dans les poches du calcaire, le manganèse s'est rassemblé, à l'état de pyrolusite, avec les résidus argileux de la dissolution du calcaire.

Turkestan russe. — Mêmes gisements de contact au milieu de calcaires et en rapport avec des roches éruptives tertiaires (syénites). Parfois le plomb y domine, plus rarement le cuivre. La magnétite, très développée, y forme souvent des gîtes exploitables.

Transbaïkalie (*Nertchinsk*). — On y connaît, à côté de filons plombo-argentifères, un certain nombre d'amas de magnétite avec sulfures complexes, au contact de porphyres et de syénites avec des calcaires.

II. — ZONES STRATIFORMES A SPINELLES ZINCIFÈRES ET SILICATES DIVERS

Ce groupe comprend des gisements où la séparation du métal d'avec la roche éruptive est plus accentuée et qui ont des apparences de couches interstratifiées dans les terrains métamorphiques. Il y a encore association de silicates et de sulfures comme dans le type Banat. C'est une sorte de transition aux filons-couches.

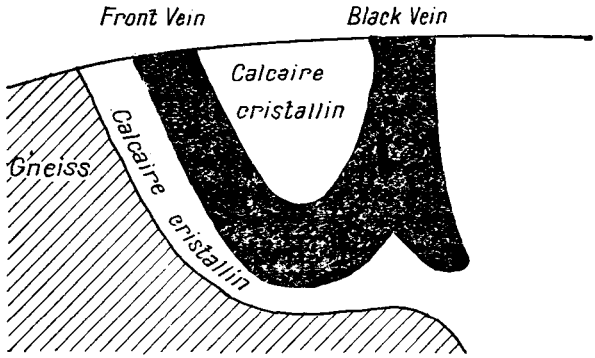


Fig. 123. — Coupe schématique du gisement de New-Jersey

New-Jersey. — Le gîte de New-Jersey, dont il a déjà été question à propos du manganèse, se présente sous la forme d'une couche plissée de 2 à 20 mètres d'épaisseur dans un calcaire cambrien reposant sur du gneiss (fig. 123). La métallisation consiste en franklinite, zincite, willé-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

mite, blende, rhodonite. Les phénomènes de métamorphisme au voisinage de filons de pegmatite ont développé dans le calcaire des gangues silicatées. Le gisement résulte d'une sorte d'imprégnation qui a épousé les plissements antérieurs du calcaire.

On peut rapprocher du type précédent les gisements de **Sterzing** (*Tyrol*) et de **Bodenmais** (*Bavière*). A Sterzing, les minerais, intercalés dans les micaschistes, forment une lentille, tantôt interstratifiée, tantôt oblique sur la schistosité. On y trouve surtout de la blende, un peu de galène, des pyrites, de la calcite, de l'apatite, de la fluorine et des silicates (grenat, amphibole...). A Bodenmais, dans le Bayrischer Wald, le gneiss contient des lentilles interstratifiées de minerais (pyrites, blende, galène) avec des spinelles zincifères et des silicates. La métallisation est en rapport avec la mise en place d'un massif intrusif de granite.

III. — IMPRÉGNATIONS STRATIFORMES DES TERRAINS CRISTALLOPHYLLIENS

Les terrains cristallophylliens présentent parfois des imprégnations blendeuses interstratifiées que l'on peut rattacher au métamorphisme de profondeur et aux pénétrations granitiques. Ce type, qui a de grandes

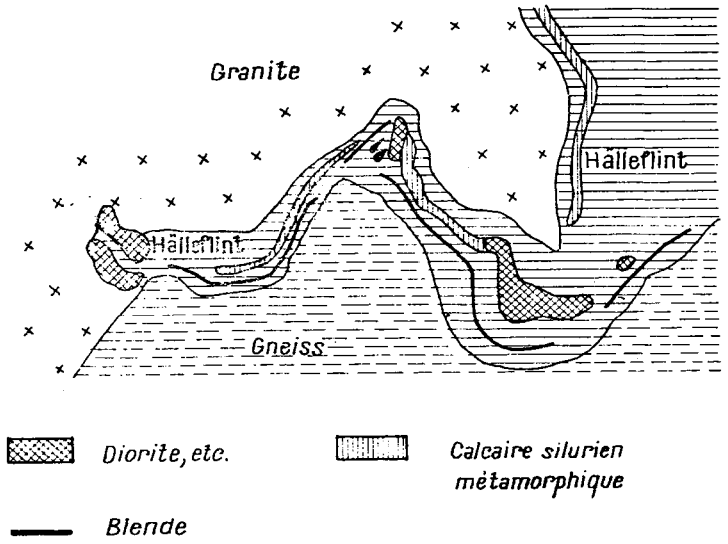


Fig. 124. — Carte schématique des gisements d'Ammeberg.

analogies avec le précédent, est bien développé dans les plates-formes primitives. La blende s'accompagne de traces de plomb, d'étain, de molybdène, etc.

Ammeberg (*Suède*). — Ce gîte se trouve dans la région du Lac Wettern. Il consiste en imprégnations et lentilles de blende au milieu d'un gneiss

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

rubané et schisteux (hälleflint). La zone de hälleflint est plissée et comprend des intercalations de diorites et des lambeaux discontinus de calcaire fossilifère du Silurien inférieur.

Les parties minéralisées du hälleflint forment des lentilles peu épaisses (8 mètres ; 13 mètres au maximum), mais s'étendant beaucoup en profondeur (jusqu'à 200 mètres) et suivant les ondulations des gneiss (fig. 125 et 126).

La composition de ces lentilles, très compactes, est souvent à peu près celle de l'hälleflint où la blende remplacerait le mica ; mais il existe des parties uniquement blendeuses. La blende renferme toujours un peu de galène et de pyrite ou de pyrrhotine. Accessoirement, on peut mentionner des silicates montrant l'intervention d'un métamorphisme de contact (tourmaline, hornblende, grenat, talc, épidote, etc.) et, dans des veines de calcite recoupant le minerai, de l'ozokérite.

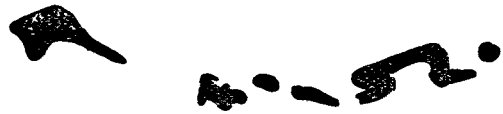


Fig. 125. — Plan d'une mine d'Ammeberg en surface.



Fig. 126. — La même mine à 150 mètres de profondeur.

Le gneiss rubané renferme jusqu'à 50 % de zinc et 7 % de galène. Pratiquement il est exploitable à partir de 20 % de zinc.

La métallisation est postérieure aux plissements et à peu près contemporaine de l'action métamorphique qui a transformé les terrains en gneiss. Elle est antérieure à de gros filons de granulite qui recoupent les minerais.

IV. — FILONS CONCRÉTIONNÉS HYDROTHERMAUX EN TERRAIN NON CALCAIRE

Les filons, d'origine hydrothermale, constituent la forme la plus générale des gisements de plomb et de zinc, surtout de plomb. Ce sont des B. P. G., où tantôt l'un, tantôt l'autre des divers sulfures prédomine, suivant les gisements et les diverses parties d'un même gisement. Ils échappent à l'étroite subordination constatée jusqu'ici à l'égard des

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

roches éruptives, puisqu'ils proviennent de l'incrustation de fissures par des dissolutions hydrothermales susceptibles de pénétrer très loin.

On les a très souvent classés d'après la *nature du remplissage* et, particulièrement, d'après la *nature de la gangue*. Ce système a des inconvénients : des filons voisins, de même type, peuvent avoir des gangues différentes ; le même filon présente quelquefois diverses gangues suivant la profondeur qu'on envisage ; enfin, certaines gangues peuvent être tout à fait accidentelles et provenir du lessivage des terrains encaissants. Les gangues habituelles sont le *quartz* qui n'est pas exclusivement dominant comme pour les métaux précédents et qui correspond à une cristallisation en masse, confuse, où le plomb est irrégulièrement disséminé, la *calcite* qui correspond au contraire à une allure nettement concrétionnée, la *sidérose*, la *dolomie*, des sulfates (*barytine*, *célestine*), la *fluorine* et, très accessoirement, des *hydrocarbures*. Suivant la nature de la gangue, l'allure du minerai varie légèrement.

Les métaux associés sont les sulfures de Pb, Zn et Fe, parfois la magnétite, l'étain, le mercure, l'antimoine, très souvent le cuivre et l'argent. La plupart des remplissages plombifères affectent une disposition lenticulaire ou tigrée ; les minerais occupent souvent une place minime par rapport aux parties stériles ; dans les filons les plus riches, ils constituent quelques lentilles aplaties de 300 ou 400 mètres de diamètre avec une épaisseur réduite de 0 m. 10 à 0 m. 30 ; le total effectif de la galène contenue dans une mine de plomb dépasse rarement 300.000 tonnes.

Le vide rempli consiste en fractures qui proviennent de deux causes : ou un déplacement vertical avec faille simple ou système de failles parallèles (Pontpéan), ou un mouvement de torsion déterminant un réseau de fractures complexes (champ de Freiberg en Saxe). Une faille, déjà métallisée, a pu rejouer (Pontpéan). Beaucoup de filons ont une allure bréchiforme (Clausthal, Sarrabus), antérieure souvent au remplissage.

Enfin, il existe aussi des filons dus à un contact hétérogène de couches d'inégale perméabilité (filons-couches).

Le type filonien a une extension limitée dans l'écorce terrestre. Les fissures ont eu tendance à se disperser dans les terrains relativement voisins de la superficie ; en profondeur, le plomb et le zinc paraissent devenir moins abondants. Il en résulte qu'au point de vue pratique, les gisements de zinc et plomb sont exposés à disparaître en profondeur : non pas qu'il y ait appauvrissement par disparition des cémentations comme pour le cuivre, mais parce qu'on arrive à la limite de précipitation en profondeur. Au-dessous de cette limite, le filon peut continuer, mais quartzeux et stérile.

La plupart des filons d'Espagne disparaissent par exemple vers 400 mètres de profondeur. Par contre, en Bohême, à 1.400 mètres, il n'y a pas d'appauvrissement. La profondeur moyenne à laquelle se produit l'appauvrissement est, en effet, fonction de l'importance de l'érosion dans la région considérée. Si l'érosion a été importante, la surface actuelle s'est rapprochée de la zone d'appauvrissement et celle-ci se trouve à une faible profondeur ; au contraire, si l'érosion a été peu importante, la surface actuelle reste très éloignée de la zone d'appauvrissement et celle-ci peut se trouver à une profondeur considérable.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les filons présentent souvent deux allures différentes selon qu'ils sont encaissés :

a) Dans des terrains *inattaquables*, inertes, *non calcaires* : ils ont alors une structure nettement concrétionnée et sont localisés à la fracture ;

b) Dans des terrains *attaquables*, *calcaires* : il se produit alors une imprégnation lente s'étendant dans le calcaire à la façon d'une tache d'huile. Le fait est surtout net pour les gîtes calaminaires ; mais il se présente aussi pour les gisements de plomb.

Nous étudierons d'abord les gisements plombo-zincifères encaissés en terrains non calcaires et classés d'après leur âge. Cet âge est, d'ailleurs, assez difficile à établir. On connaît des *filons primaires*, surtout dans les chaînes hercyniennes, et des *filons tertiaires*, soit dans les chaînes hercyniennes disloquées à l'ère tertiaire, soit dans les chaînes tertiaires.

a) Filons primaires.

Ce sont les moins nombreux. Ceux qui ont dû être encaissés dans les plates-formes très anciennes (Scandinavie, Finlande, Canada) et dans les chaînes antérieures à la chaîne hercynienne n'existent pour ainsi dire plus, détruits par l'action de l'érosion.

α) **Filons de Grande-Bretagne.** — Ils sont peut-être contemporains de la chaîne calédonienne. On les connaît dans **l'Ile de Man**, dans **l'Ile d'Anglesey**, dans le **Pays de Galles** ; ils recoupent le Cambrien et l'Ordovicien. On y rencontre des zones de broyage dans les schistes, avec formation d'une sorte d'argile et minerais cimentant une brèche de débris schisteux. Une des mines est connue pour ses dégagements d'hydrocarbures, en rapport avec l'altération des schistes. La gangue est surtout quartzeuse. Il y a association avec un peu de chalcopyrite.

D'autres filons se trouvent dans la chaîne hercynienne.

β) **Filons de Bretagne.** — Ils sont assez nombreux, mais ne sont plus guère exploités (*Pontpéan*, *Huelgoat*, *Poullaouen*, *La Touche*). Leur âge est difficilement déterminable : ils recoupent tous les terrains primaires, y compris le Dinantien. Ils datent peut-être du Carbonifère supérieur. Certains ont tout au moins rejoué au Miocène.

Les mines du **Huelgoat** et de **Poullaouen** (Finistère) ont été exploitées dès l'époque romaine. Elles l'ont été aussi au temps de Louis XIII ; de 1750 à 1868, elles comptaient parmi les plus importantes de France. Les gisements comprennent un certain nombre de filons plombifères, à gangue quartzeuse, qui recoupent les granites, microgranites, schistes dévoniens et dinantiens et sont orientés Nord-Sud. Le filon principal d'Huelgoat a 1.100 mètres avec une épaisseur de 3 à 4 mètres ; il traverse les schistes perpendiculairement. Productif dans les roches résistantes, il est à peu près stérile dans les schistes trop tendres. L'épaisseur réduite n'est guère que de 0 m. 10 par mètre de largeur et la galène tient 1 kilogramme d'argent à la tonne. Dans les parties superficielles, les altérations ont donné des chlorures, bromures, iodures d'argent, de l'argent natif, de la pyromorphite, de la cérusite, du plombgomme,... dans une gangue de terre rouge.

La mine de **Pontpéan** (*Ille-et-Vilaine*), située au Sud de Rennes, a peut-être été, elle aussi, exploitée par les Romains : elle était déjà connue en

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

1630 et a été activement exploitée de 1730 à 1794. Elle fut reprise plusieurs fois au courant du XIXe siècle avec des alternatives de prospérité et de travail à perte. La mine a été fermée en 1904, après avoir atteint 600 mètres de profondeur. Le filon de Pontpéan est le plus important et le plus riche des filons quartzo-plombifères de la Bretagne. Il recoupe les schistes précambriens et siluriens et est accolé, du côté de son toit, à un filon de diabase dans laquelle il pénètre sur une petite partie de son parcours ; il est donc postérieur à cette diabase. Après une première métallisation, la fracture a rejoué postérieurement au Miocène : cette faille tertiaire a donné lieu à la formation de brèches et d'une argile due au broyage ; elle a produit une dénivellation de 220 mètres et a amené en contact avec le filon des formations argilo-sableuses miocènes. Celles-ci ont provoqué de grandes venues d'eaux superficielles dans les travaux de la mine ; de sorte qu'elles ont compliqué l'exploitation et ont contribué au développement des altérations : altération de la diorite et formation de cérusite et pyromorphite aux affleurements.

Le remplissage est constitué par du quartz et des sulfures distribués en lentilles : la galène prédomine de beaucoup par rapport à la blende et à la pyrite. C'est une galène riche en argent qui a donné de 500 grammes à 2 kilogrammes d'argent à la tonne. Elle a une épaisseur réduite de 6 cen-

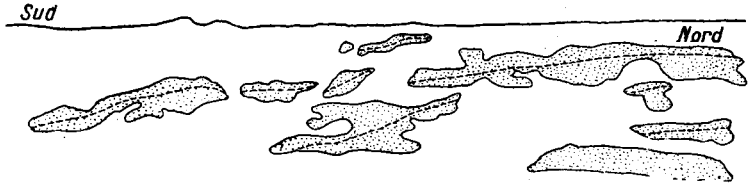


Fig. 127. — Coupe schématique des lentilles minéralisées de Pontpéan (suivant la direction du filon).

timètres (en moyenne). Suivant l'époque, la production de la galène par m² de surface a extrêmement varié. Par m² du filon, on a eu par exemple :

Proportion des minerais à Pontpéan	1898	1900	1902	1903
Galène	1.371 kg.	836 kg.	660 kg.	496 kg.
Blende	300 »	436 »	161 »	250 »
Pyrite	3,5 »	8,5 »	41 »	30 »

Au total, de 1853 à 1904, le filon a produit 244.000 tonnes de galène marchande dont le prix a oscillé de 90 à 290 francs-or la tonne.

A **La Touche** (*Ille-et-Vilaine*), le filon est encaissé dans le granite sur environ 1 kilomètre de long. Il contient du quartz, de la galène et de la blende argentifères, de la pyrite et, dans les parties hautes, un peu de stibine. Le granite encaissant est kaolinisé au contact.

γ) **Filons de la Meseta espagnole.** — Parmi les filons de plomb de la

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Meseta espagnole, qui semblent représenter des venues hercyniennes, il faut citer les gisements de *Linarès-la-Carolina*, les gisements de *San-Quintin* et l'*Horcajo* et ceux de *Hien de la Encina* (Guadalajara).

Le très important district de **Linarès-la-Carolina** est formé de terrains primaires plissés (schistes cambriens, schistes et quartzites siluriens avec massifs de granite), recoupés par de nombreux filons métallifères, que recouvre une trangression de grès rougeâtres réputés triasiques. Les filons se rattachent vraisemblablement aux fractures connexes des mouvements hercyniens ; ils ont dû subir une érosion assez longue avant d'être recouverts par la transgression gréseuse.

Tous ces filons font partie d'un ensemble, unique et assez simple, de fractures presque parallèles, s'étalant légèrement en éventail vers l'Ouest. Leur allure est assez variable, suivant la nature de la roche encaissante, schistes ou granite ; mais il est impossible d'établir des règles générales sur la relation de leur richesse avec la nature de la roche encaissante. Le

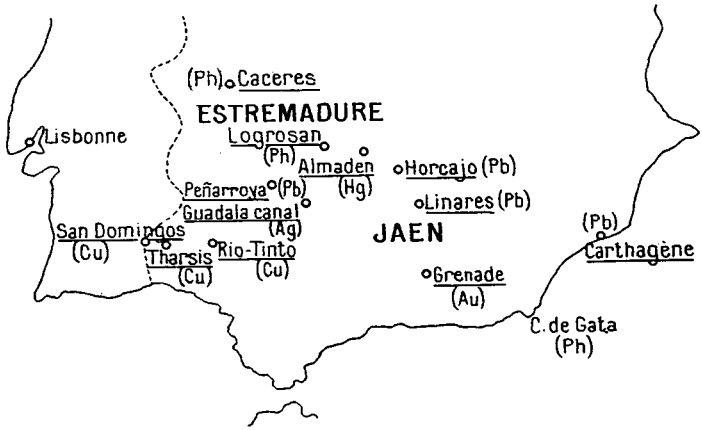


Fig. 128. — Principaux gîtes miniers de l'Espagne méridionale.

plus souvent, le filon s'éparpille et s'appauvrit en passant du granite aux schistes ; dans quelques cas, le passage se fait sans modification ; ailleurs on a cru remarquer, au contraire, un appauvrissement correspondant au passage des schistes dans le granite. En tout cas, la direction ne change pas au cours de ce passage.

Les filons ont une largeur de 0 m. 40 à 2 mètres, avec une épaisseur réduite de 6 à 10 centimètres ; ils sont presque verticaux et sont exploités jusque vers 500 mètres de profondeur. La galène disparaît généralement vers 300 à 400 mètres, comme si l'on atteignait le fond de la zone où s'est opérée la précipitation du plomb. Si cette disparition est bien définitive, il faut en conclure que l'érosion post-hercynienne a atteint une zone particulièrement profonde et n'a laissé subsister qu'une faible partie des filons primitifs.

Comme minéralisation, on a surtout du quartz et de la galène, très peu de blende et de la pyrite parfois cuivreuse. Dans certains gisements, le

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

cuivre devient même l'élément dominant, en particulier au voisinage de la surface où il a pu être enrichi.

Les phénomènes d'altération se manifestent parfois jusqu'à des profondeurs notables (300 et 400 mètres). Sous le chapeau de fer, on rencontre, avec de la galène, de la cérusite, de la pyromorphite, des vanadates, de la mimétèse, de la limonite, une argile ocreuse, des minerais oxydés de cuivre, un peu d'argent natif et d'argyrose. On a eu aussi des traces de crocoïse. La barytine et la sidérose peuvent accompagner le quartz, comme gangues, dans les parties superficielles.

Les filons de *Linarès* sur lesquels portent les principales exploitations sont encaissés dans le granite ; ils affleurent presque tous ; ils ont une largeur de 0 m. 80 à 1 m. 50 et leur teneur brute oscille entre 12 et 90 % de plomb. Dans certains, il y a très peu d'intervalles stériles. La galène s'y présente souvent par zones appelées bolsadas correspondant aux parties élargies des filons qui ont une allure noduleuse.

Les filons de *la Carolina*, encaissés dans les schistes, sont moins développés ; ils s'interstratifient et se ramifient dans les schistes.

Le gisement de **San Quintin**, exploité d'abord par les Romains, a été repris depuis 1883 par la Société de Peñarroya et a donné de très beaux résultats, surtout par sa richesse en argent. Il y a là un réseau de fractures qui se sont ouvertes dans les schistes et qui contiennent un remplissage de B. P. G. avec galène dominante. Ces fractures sont nettes quand les schistes sont durs ; elles s'éparpillent au contraire quand les schistes sont tendres. Les phénomènes d'altération, très développés, se poursuivent loin en profondeur ; ils ont donné naissance à une grande abondance de cérusite dans les parties hautes, puis à de l'oxyde de fer qui fait place à la pyrite vers 500 mètres ; on y trouve aussi de la sidérose, des lentilles de gypse, de la pyromorphite. Ce sont ces mêmes phénomènes qui ont permis la concentration de l'argent : la galène en renferme 700 grammes à 3.500 grammes à la tonne. La gangue dominante est le quartz, avec un peu de calcite et de la barytine très rare.

Les filons de galène argentifère de l'**Horcajo** (Province de Ciudad Réal) sont du même type. Exploités par la Société de Peñarroya, ils ont donné de beaux résultats au début du xx^{e} siècle ; ils sont aujourd'hui abandonnés. Leur teneur en argent a dépassé 4 et 5 kilogrammes par tonne de galène ; d'autre part, leurs minerais dépourvus de baryte et de pyrite nécessitaient peu de triage. Mais les venues d'eau dans la mine étaient d'une intensité exceptionnelle. Les filons traversent des schistes siluriens.

Quant aux gisements de **Hien de la Encina**, situés dans la Sierra de Guadalajara, ils se rapprochent beaucoup de ceux du Mexique : ce sont des filons barytiques à enrichissements argentifères superficiels. Très anciennement, on en a retiré jusqu'à 15 kilogrammes d'argent à la tonne de plomb (argent natif, pyrargyrite, chlorures, bromures,...) ; à partir de 300 mètres de profondeur, on n'a plus trouvé d'argent.

δ) **Filons de la Provence cristalline.** — Le filon des **Bormettes** (*Var*) est situé dans le massif hercynien des Maures, près d'Hyères. Exploité depuis longtemps, il a eu une fortune brillante entre 1887 et 1903. Son âge hercynien est nettement démontré par un recouvrement de Permien, dans lequel

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

il ne pénètre pas. Sa puissance varie entre 0 m. 50 et 6 mètres ; elle est en moyenne de 1 m. 60. Le remplissage comprend, avec des débris des phyllades encaissantes, d'âge précambrien, et une gangue de quartz, des B. P. G. peu pyriteux où la blende domine. La surface exploitée représente 1/5 à 1/4 de la surface totale, le reste étant à peu près stérile. En outre, il y a une faible teneur en cuivre.

ε) **Filon de Broken-Hill (Australie).** — Le gisement de **Broken-Hill** dans la Nouvelle-Galles-du-Sud, est l'un des plus importants du monde. Il se compose de filons-couches, intercalés dans un système très redressé de gneiss, quartzites, schistes cristallins grenatifères, que traversent des granites et des diorites. Le filon principal, dont la puissance peut atteindre 30 mètres, se bifurque en profondeur (fig. 129) ; il semble résulter d'un bâillement dans les schistes cristallins. Le remplissage primitif comprend un mélange de galène et de blende, avec quartz, grenats, rhodonite, fluorine ; la pyrite est subordonnée. Les réactions d'altération et de cémentation ont transformé le gîte et l'ont enrichi dans ses parties hautes. En partant de la surface, on a trouvé : d'abord un chapeau de fer avec psilomélane, cristaux d'argent et calamine ; puis des cérusites et des kaolins argentifères, riches en grenats, avec de la barytine ; ce kaolin vient de la décomposition de roches feldspathiques : l'argent y existe à l'état d'argent natif, de chlorures, bromures, iodures (1.800 grammes à la tonne) ; il est accompagné d'anglésite, cuprite, cuivre natif, malachite, calamine. Cette zone kaolinisée est séparée du minerai intact, profond, par une mince zone de cémentation (Teneur : 8 kilogrammes d'argent à la tonne). En profondeur, la teneur en argent diminue considérablement. Il s'y est produit des venues d'eau très importantes.

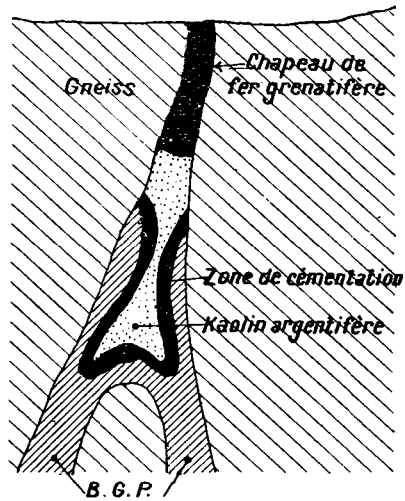


Fig. 129. — Coupe verticale du filon de Broken-Hill.

La production du gisement est montée jusqu'à 200.000 tonnes de plomb par an et 50 à 60 millions de francs-or d'argent. La production de blende s'est accrue en profondeur (400.000 tonnes en 1910). Le nombre des ouvriers employés a atteint 10.000.

b) Filons tertiaires de la chaine hercynienne.

α) **Filons du Massif Central français.** — Il y a là une série de filons en rapport avec les dislocations tertiaires produites par les plissements pyrénéens et alpins. Quelques-uns ont été exploités avec fruit.

A **Vialas** (*Lozère*), sur la bordure S.-E. du massif, il existe un champ de fractures très compliqué, analogue à celui de la Saxe, qui a fait l'objet

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

d'études détaillées. Les filons y sont quartzeux ou barytiques : la minéralisation est parfois très argentifère suivant certaines directions de fractures. On a cherché autrefois dans tout le Massif Central les filons de même direction avec l'espoir d'y trouver la même minéralisation. Ces recherches ont été infructueuses : ce qui prouve que l'idée dont on partait était fausse.

L'ordre de succession dans les venues semble être le suivant :

1° Galène pauvre avec quartz et calcite lamellaire ;

2° Après une réouverture, galène argentifère avec calcite et barytine rose ;

3° Barytine stérile ;

4° Nouvelle venue de galène très argentifère avec calcite et barytine rose.

Dans l'ensemble le vrai remplissage paraît l'ancien qui a amené les B. P. G. ; les autres venues peuvent être l'effet de déplacements exercés par les eaux souterraines sur les minerais et les minéraux primitivement déposés. Enfin on a observé à Vialas des filons dont l'âge du remplissage peut être bien différent de l'âge de la fracture. Les résultats industriels n'ont jamais été brillants.

On peut rapprocher de Vialas les gisements voisins : Le *Bleymard*, dans la Lozère ; *Notre-Dame-de-Laval*, *Malbosc*, dans l'Ardèche ; *Villemagne* (organisé en grand récemment), dans le Gard ; *Aurouze* dans la Haute-Loire.

A **Pontgibaud** (*Puy-de Dôme*), le gisement est formé d'une grande cassure filonienne, à peu près Nord-Sud, qui paraît se prolonger avec des intermittences sur une assez grande longueur. Son âge est mal déterminé ; il est postérieur au Carbonifère qu'il recoupe ; il est antérieur aux basaltes pliocènes qui le recouvrent ; si on le rapproche des fractures voisines qui recoupent l'Oligocène, il a des chances d'être miocène. Le filon a jusqu'à 14 mètres de diamètre ; il est intercalé dans des gneiss ; le remplissage est argileux ou bréchoïde, avec veine de quartz chargée par endroits de galène, d'un peu de blende, de barytine et, exceptionnellement, de bournonite. Jusqu'à 200 mètres de profondeur, on a pu distinguer dans le filon deux lentilles de minerais tenant 1 kg. 500 d'argent à la tonne ; à partir de 200 mètres, il s'est stérilisé, aminci ; on a dû s'arrêter vers 250 mètres. L'étude du gisement de Pontgibaud a montré des zones alternantes d'élargissement et de rétrécissement et a permis de vérifier la diminution progressive de la teneur en argent quand on s'enfonce, fait qui semble lié aux phénomènes d'altération superficielle. Des kaolins se sont formés aux dépens de la roche encaissante.

Sur la bordure Ouest, Sud-Ouest et Nord du Massif Central, on a exploité des imprégnations plombifères qui se prolongent dans les terrains secondaires en bordure. A *Alloue* (*Charente*), la métallisation se prolonge jusque dans le Jurassique ; dans l'*Indre*, vers *La Châtre*, le recouvrement de grès triasique a été minéralisé par de la silice, de la galène et de la fluorine ; dans le *Morvan*, un certain nombre de gîtes plombeux à quartz et fluorine ont imprégné les strates sédimentaires du pourtour (Lias, grès triasique) : ainsi aux environs d'*Avallon* (*Yonne*), de *Corbigny* (*Nièvre*), de *Chitry-les-Mines* (*Nièvre*).

β) **Filons des Vosges et de la Forêt-Noire.** — Dans ces deux massifs

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

hercyniens, où les dislocations tertiaires se sont fait sentir, on retrouve les mêmes types de filons plombifères que dans le Massif Central.

A **Giromagny**, près de Belfort, les filons, très nombreux et anciennement exploités, étaient formés de galène plus ou moins argentifère, parfois associée avec de la chalcopyrite, de la panabase, du mispickel et du cinabre.

A **Sainte-Marie-aux-Mines**, en Alsace, les mines étaient déjà exploitées au x^e^ siècle ; à la Renaissance, elles occupaient 3.000 ouvriers et étaient très prospères ; elles furent reprises au XVIII^e^ siècle, puis au XIX^e^ et enfin en 1910. Les filons qui traversent le gneiss sont très nombreux et présentent des remplissages complexes comme à Freiberg ; à la galène s'associent parfois des minerais de nickel et de cobalt, de la chalcopyrite, du cuivre gris, du mispickel, du bismuth. On en a retiré de l'arsenic natif, du réalgar. Les parties superficielles ont subi des concentrations argentifères ; ainsi on a extrait de la mine de gros blocs d'argent natif (dont un de 582 kilogrammes), avec argyrose et argent rouge.

On connaît aussi divers filons dans le Duché de Bade.

γ) **Filons du Hartz.** — Le Hartz est un vaste plateau de forme demi-elliptique, divisé en 2 bassins : à l'Ouest, l'*Oberharz* (*Clausthal*, *Sanct-Andreasberg*) et, à l'Est, l'*Unterharz* (*Rammelsberg*). C'est un horst hercynien, formé de granite et surtout d'assises primaires (Silurien, Dévonien, Carbonifère) et enveloppé par les transgressions permiennes et triasiques. Il a subi des dislocations très nombreuses d'âge discuté : les unes paraissent correspondre à la montée des granulites (âge hercynien) ; les autres semblent postérieures, peut-être miocènes et même plus récentes. Certaines de ces cassures sont métallisées.

Le champ de fractures de **Sanct-Andreasberg**, dessinant un réseau compliqué de parallélogrammes, est compris entre deux surfaces de glissement (ruschels), antérieures à la métallisation et qui, par suite du frottement des couches les unes sur les autres, se sont remplies de fragments de schiste englobés dans de l'argile. Ces ruschels ont jusqu'à 60 mètres de puissance. Dans l'intervalle, se retrouvent un certain nombre de ruschels secondaires. Les vrais filons, souvent argentifères, de 0 m. 50 de puissance, contiennent un remplissage de calcite, quartz, rarement fluorine, galène, blende, un peu de minerais de nickel et de cobalt, arsenic natif, argent rouge, argent natif. L'isolement des minerais argentifères vient d'une série d'altérations et de remaniements. On a remarqué dans ce gisement que la teneur en argent de la galène variait avec la grosseur du grain.

A **Clausthal**, il y a de même, dans les terrains primaires, un certain nombre de zones de friction ou ruschels et beaucoup de filons-failles à rejets parfois considérables (200 mètres). Les filons ont généralement une salbande bien nette au mur, tandis qu'au toit ils se confondent avec la roche encaissante par des ramifications et atteignent souvent 40 mètres et plus de puissance. Le remplissage est bréchiforme ; des débris arrachés aux roches encaissantes sont cimentés par des gangues et des minerais : B. P. G. avec chalcopyrite, quartz, calcite, barytine, accessoirement sidérose. Tantôt la galène est fortement argentifère, tantôt elle est pauvre en argent.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Le gisement du **Rammelsberg** est un amas de pyrite cuivreuse, d'origine sédimentaire pour beaucoup de géologues allemands, d'origine intrusive plus probablement. Il est accompagné d'une large zone d'imprégnations pyriteuses. Les minerais ont une disposition zonée qui paraît résulter de la pyritisation de schistes déjà fortement froissés et disloqués.

δ) **Groupe de Freiberg** (*Saxe*). — Il est classique à cause des études détaillées qui y sont faites depuis plusieurs siècles.

Il y a là, dans un espace restreint, un ensemble de filons très complexes (plus de 1.800) formant tout un grand système en dents de scie, avec une direction dominante N. W.-S. E., et des séries de cassures à peu près orthogonales. Le schéma général ressemble beaucoup à celui obtenu par Daubrée en faisant subir un mouvement de torsion à une plaque de verre.

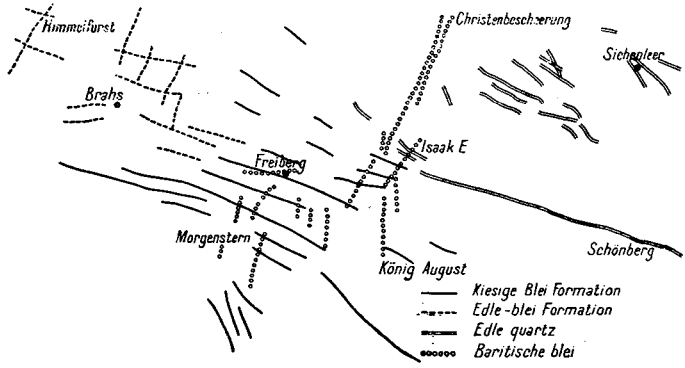


Fig. 130. — Carte schématisée des filons de Freiberg (en supprimant les filons non métallisés).

Le champ de fractures n'a pas moins de 25 kilomètres de large ; on y a exploité 849 filons pour plomb, argent et cobalt, 465 pour plomb et argent, 181 pour argent seulement. Le district est connu depuis plus de sept siècles et a dû, à l'origine, être assez analogue aux grandes régions minières du Nouveau-Monde. L'exploitation, très florissante au début du XIX^e^ siècle, a beaucoup périclité depuis 1870 ; en 1909, elle occupait encore plus de 1.300 ouvriers.

Dans l'ensemble, cette partie de la Saxe appartient à un ancien massif hercynien, composé de granulite, de gneiss rouges granulitiques, de gneiss gris, recouvert d'un manteau de schistes argileux et micacés. La transgression crétacée a envahi la pénéplaine sur son bord oriental (vallée de l'Elbe) ; la transgression oligocène, sur le bord Sud (pied de l'Erzgebirge). Le massif est recoupé par une multitude de fractures.

Il est fortement métallisé, mais par taches presque homogènes. Vers le Sud, au voisinage des granites, on trouve des gisements d'étain, d'urane ; puis, vers le Nord, en s'éloignant des granites, des groupements plombifères et quartzo-argentifères. Toutes ces métallisations ne sont pas contemporaines : en effet, il existe de grands filons de porphyre quartzifère permiens qui traversent les filons quartzo-argentifères (edle Quartz), mais qui sont recoupés par les filons sulfurés plombifères du kiesige Bleierz.

Les venues métallifères de la région de Freiberg semblent, d'après une

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

étude minutieuse des intersections de filons, s'être succédées dans l'ordre suivant :

1° *Le Quartz noble (edle Quartz).* — C'est une venue quartzeuse argentifère ; elle contient des minerais d'argent proprement dits, finement disséminés (argent rouge), des traces sensibles d'or, des B. P. G. également très argentifères, des carbonates (dialogite). Comme les filons de quartz noble ont été exploités jusqu'à une profondeur de 500 mètres, il est difficile d'attribuer la concentration de l'argent aux seuls phénomènes d'altération. On a vu un de ces filons en rapport avec des terrains charbonneux qui ont dû intervenir dans la réduction de l'argent.

2° *Les venues plombifères B. P. G. proprement dites* qui se subdivisent elles-mêmes dans l'ordre suivant :

a) *La kiesige Bleierz Formation* ou venue plombeuse avec quartz ; c'est un type très courant : galène, blende, pyrite, chalcopyrite, mispickel. La gangue est surtout quartzeuse ; on y trouve aussi un peu de calcite et de sidérose, et accessoirement, de la barytine, de la fluorine, des minéraux d'argent, du cuivre gris. La galène, la blende sont argentifères. On y reconnaît des traces d'étain. Les filons de ce groupe ont une largeur moyenne de 0 m. 10 à 0 m. 80, rarement de 2 mètres, avec une épaisseur réduite de 0 m.10 environ. L'un d'eux a été reconnu sur 7 kilomètres de long. Leur exploitation a été progressivement abandonnée : elle ne subsiste que pour deux mines fiscales.

b) *La karbonspatige Bleierz-Formation ou edle Bleierz Formation* (formation plombeuse à carbonates spathiques). Les minerais sont les mêmes : galène et blende argentifères, pyrite, minerais d'argent nobles ; mais la gangue consiste en carbonates (calcite, braunspath, sidérose, dialogite) qui s'ajoutent au quartz. La galène est plus riche en argent que dans le groupe précédent (jusqu'à 6 kilogrammes à la tonne) ; la blende aussi ; la pyrite arrive parfois à tenir 2 kilogrammes d'argent. Il y a donc dans ces filons un enrichissement en argent. Leur structure est plus zonée que celle des filons précédents : on trouve en principe les carbonates et la galène sur les parois ; le quartz, au centre du filon.

c) *Le barytische Blei* (formation plombeuse barytique). Cette formation donne des filons très larges (1 à 4 mètres et jusqu'à 6 mètres) qui sont les plus jeunes de Freiberg. Le caractère hydrothermal y est encore plus accentué que dans les types précédents. Les gangues y sont la barytine, la fluorine et le quartz, disposés en minces couches rubanées. Les minerais sont, soit en minces couches, soit en imprégnations dans les gangues : ils consistent en galène, pyrite, blende, chalcopyrite. Ils sont pauvres en argent, sauf à leurs croisements avec des filons plus anciens. Les filons sont nettement concrétionnés ; ils peuvent présenter 50 ou 60 zones parallèles ; souvent, au centre, il reste des géodes, parfois assez grandes pour qu'un homme puisse y pénétrer et qui peuvent contenir de l'eau. Il est possible que les venues récentes aient emprunté leurs éléments aux plus anciennes par une circulation d'eaux chaudes analogues aux eaux thermales actuelles. On connaît aussi des types de remplissage bréchiforme, moins nets que ceux du Hartz.

Dans l'ensemble de ces formations de Freiberg, il semble donc qu'on voie s'accentuer de plus en plus le rôle des eaux et diminuer celui des fumerolles

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

ignées : les gangues, d'abord quartzeuses dans les filons les plus anciens, sans doute les plus directement reliés aux roches ignées, passent aux carbonates, puis au groupe barytine et fluorine.

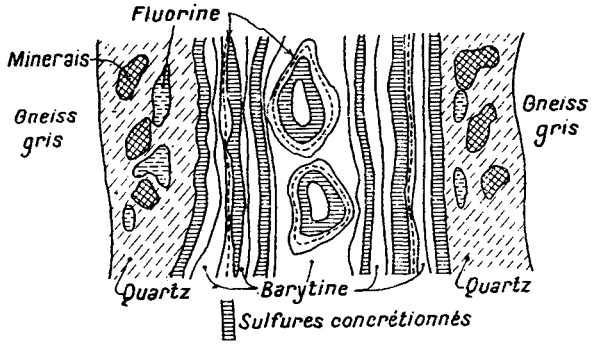


Fig. 131. — Schéma d'un filon concrétionné à Freiberg (Saxe).

ε) **Groupe de Przibram** (*Bohême*). — Le système filonien de Przibram (fig. 133) est intéressant par la profondeur considérable qu'ont atteinte les exploitations (1.100 mètres). Le champ de filons y est moins compliqué qu'à Freiberg : il forme un faisceau presque N.-S., réuni par quelques fractures transversales. Ce faisceau coupe obliquement les diverses formations sédimentaires (schistes et grauwackes) (voir fig. 133). Dans les grauwackes, les cassures sont nettes ; dans les schistes au contraire, elles s'éparpillent selon la schistosité et les filons s'appauvrissent. La zone métallisée a environ 4 kilomètres de large et la zone vraiment riche n'occupe guère qu'un kilomètre carré. Les filons, parfois très minces, atteignent en certains points jusqu'à 8 mètres.

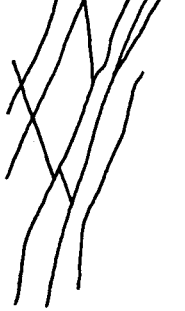


Fig. 132. — Coupe verticale des filons de Przibram (Bohême).

Le remplissage, dans la zone profonde, consiste en B. P. G. avec quartz et calcite. Il y a, en outre, association avec l'antimoine (boulangérite, bournonite). On trouve, à l'état subordonné, du cuivre (chalcopyrite), du nickel, du cobalt, de l'uranium (pechblende), de l'étain (stannine), du bismuth, du tungstène (schéelite). La teneur en argent de la galène varie sans aucune espèce de loi. Dans un puits, on a constaté, après un appauvrissement assez long, un enrichissement vers 650 mètres. Par suite des altérations, on a d'abord exploité, dans les parties hautes, un chapeau de fer à argent natif, avec cérusite, pyromorphite, wulfénite, malachite. Les altérations jouent parfois un rôle important jusqu'à de grandes profondeurs où on a trouvé des minerais d'argent proprement dits (argents rouges, argent natif) et du cuivre gris. Certains filons sont riches en manganèse.

Non loin de Przibram, le champ de filons de **Mies** (*Bohême*) est encore plus régulier qu'à Przibram : il est formé d'éléments généralement paral-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

lèles, avec très peu d'intersections. On y trouve l'association de la galène argentifère et du quartz.

ζ) **Autres gisements**. — Hors d'Europe, on connaît d'autres filons d'âge tertiaire, dans la chaîne hercynienne : *Steppe kirghise, Altaï russe, Sibérie* (district d'*Atchinsk*).

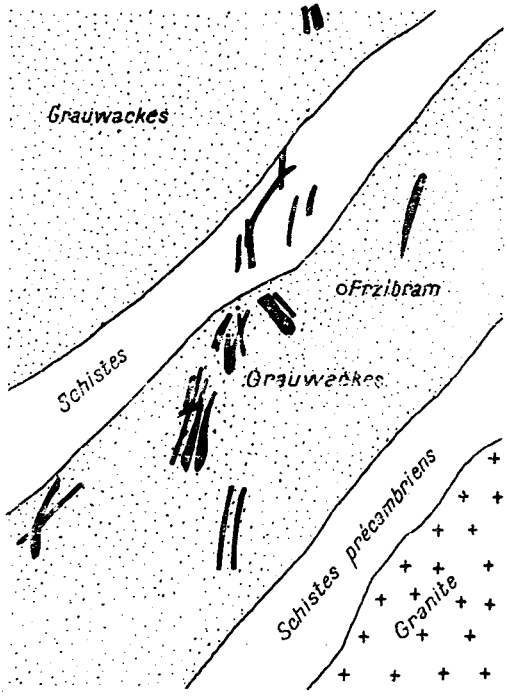


Fig. 133. — Carte des filons de Przibram (Bohême).

c) Filons tertiaires des chaines récentes

On trouve des gisements de ce genre en *Espagne* (région de *Carthagène*), dans les *Pyrénées*, dans les *Apennins*, dans les *Alpes*, en *Algérie*, au *Japon*, dans les *Montagnes-Rocheuses* (*Etats-Unis*), au *Mexique*, au *Chili*, etc.

Ils présentent en moyenne moins de régularité et de constance que ceux qui sont encaissés dans les terrains anciens, plus compacts et plus homogènes. Les cassures ont souvent une tendance à s'éparpiller ; les filons sont généralement irréguliers, sauf quand ils ont pris l'allure de filons-couches au contact de terrains de nature différente.

α) **Région de Carthagène et de Mazarron** (*Espagne, Province de Murcie*). — Dans la région de **Carthagène** (*Espagne*), les minerais sont connus depuis la plus haute antiquité (Carthaginois, Romains). Il y a là, au milieu de calcaires et de schistes triasiques, des filons très bien caractérisés (Mazarron, Almeria), associés à des trachytes tertiaires et rappelant ceux du

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Nevada, en Amérique. Comme les plus anciens sont post-triasiques, on est tenté de les rattacher tous à une même phase tertiaire.

Vers **Carthagène**, les minerais forment surtout des filons-couches (*capas, mantos*), au contact de schistes et de calcaires ; ces filons-couches s'expliquent facilement par une intrusion hydrothermale dans des terrains perméables, sous un ensemble de terrains schisteux imperméables. La couche minéralisée, dite « des silicates », présente un mouchetage de galène avec de la calcédoine ferrugineuse, de la magnétite, de la blende, de la pyrite et parfois de la chalcopyrite, en proportions très irrégulières. Etant donné leur richesse et leur constance, ces filons-couches ont pu être exploités fructueusement.

Il y a de plus, dans les schistes, des lentilles passant à des amas (imprégnations diffuses) avec galène moins abondante et un peu plus de blende ; la pyrite y est transformée superficiellement en hématite. Enfin, dans les calcaires, existent de grands amas de calamine, devenus aujourd'hui en profondeur complètement filoniens, des « *crestones* », c'est-à-dire des amas de galène, sidérose, avec minerais oxydés de zinc, de plomb ; on y a trouvé des hématites très argentifères. Ce sont des produits d'altération, caractérisés par la présence du manganèse. On doit donc noter ici l'association de Pb, Fe, Zn, Mn.

A **Mazarron**, le gisement consiste en nombreux filons de galène argentifère dans un massif d'andésite tertiaire ; ces filons se coincent en profondeur. Beaucoup d'entre eux peuvent être considérés comme des fissures de retrait de la roche volcanique ; mais il peut y avoir aussi de véritables fentes de dislocation.

β) **Filons des Pyrénées.** — Il y a, dans les *Pyrénées*, un très grand nombre de gisements sans grande importance industrielle, encaissés dans des marnes ou dans des schistes ; ils sont en effet très irréguliers par leur formation même et ils ont été disloqués depuis, de sorte que leur état de morcellement est très grand ; cependant quelques mines donnent de bons résultats.

La régularité est plus grande sur le versant espagnol ; les filons y sont plus nets, surtout quand ils traversent des terrains anciens. Sur le versant français, il y a eu tendance à l'éparpillement dans les schistes en minces filons-couches irréguliers.

1) *Versant français.* — La mine de **Pierrefitte** (*Hautes-Pyrénées*) a passé par des alternatives de prospérité et de crise. On y trouve une sorte de filon-couche formé d'une masse siliceuse plombifère, intercalée dans des schistes et des microgranites. Cette masse a de 6 à 7 mètres d'épaisseur ; seulement la minéralisation y est très irrégulière ; on suit des centaines de mètres stériles et on rencontre parfois des lentilles de galène ou de blende d'une richesse considérable. La magnétite accompagne les P. B. G. Actuellement, la zone plombifère est épuisée ; dans son prolongement vers le Nord, on trouve des filons zincifères.

Vers **Argelès** (*Hautes-Pyrénées*), la minéralisation est moindre.

2) *Versant espagnol.* — Sur le versant espagnol, au **Suelza**, il y a un système de filons-failles dans le Permien juxtaposé par faille au Jurassique.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

La fracture est assez nette et présente 30 à 40 alternances de blende, pyrite, galène. La calcite y domine comme gangue.

γ) **Filons des Alpes.** — Des exploitations du même genre ont existé dans les Alpes (de la *Savoie* jusqu'à l'*Isère*) et sont abandonnées aujourd'hui. On en a extrait de la galène, de la blende, de la sidérose, avec un peu d'argent, de chalcopyrite, de nickel et de cobalt, et même d'or (*La Gardette*). Ces gisements ont été exploités pour plomb jusqu'au XIXe siècle. Ainsi le gisement des **Chalanches** (*Isère*), celui de l'**Argentière** (*Hautes-Alpes*), celui de **Grand-Clot** (*Hautes-Alpes*). Ce dernier est très curieux par la netteté de ses trois filons qui se ramifient à la partie inférieure, où ils sont interstratifiés dans les micaschistes verticaux, et qui pénètrent, à leur partie supérieure, dans les quartzites et dolomies du Trias reposant sur la tranche des micaschistes.

Les gisements de **Macot** et de **Pezey**, près Moutiers (*Savoie*), tous deux très élevés (2.000 et 1.850 mètres), ont été activement exploités sous le Premier Empire.

δ) **Ligurie et Toscane.** — En *Ligurie* et en *Toscane* (*Italie*), on trouve une série de gisements ayant l'allure de filons-couches ou de filons de contact. Les plus riches sont au voisinage des calcaires et sont constitués par des amas calaminaires. Cependant il existe des décrochements contenant des filons de B. P. G.

V. — GRÈS PLOMBIFÈRES ET CUPRIFÈRES

Ce type de gisements se présente sous forme d'iimprégnations et de nodules dans des grès avec apparence sédimentaire. Son origine est néanmoins discutable et a quelquefois été expliquée par une imprégnation hydrothermale de nature filonienne.

Le meilleur exemple de ces formations se trouve sur la *rive gauche du Rhin*, entre Sarrelouis et Aix-la-Chapelle : notamment à **Commern, Mechernich** (*Prusse Rhénane*) et à **Saint-Avold** (*Lorraine*). Tous ces gisements consistent en grès triasiques (bigarré ou vosgien) renfermant des grains, des nodules ou des veines éparpillées de galène, avec un peu des blende et parfois un peu de cuivre et de pyrite. Aux affleurements, les minerais se sont oxydés par altération et ont donné de la cérusite, des carbonates de cuivre et même de la wulfénite (molybdate de plomb). On a généralement deux niveaux plombifères nets à nodules (comme à Commern) recoupés par des failles : chacun peut atteindre 15 mètres. Les nodules des grès sont, en principe, des concrétions de grains sableux cimentés par de la galène et ayant une tendance à prendre les formes cristallines de la galène. Les concrétions peuvent avoir de grandes dimensions (jusqu'à 3 mètres).

VI. — GISEMENTS ENCAISSÉS DANS LES CALCAIRES

Dans ce cas, ont eu lieu des phénomènes de substitution par métasomatose ; il s'est produit des sulfates qui ont donné des carbonates métalliques et du sulfate de chaux ; celui-ci n'a été conservé un peu abondamment que

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

dans des cas exceptionnels (comme dans les grottes du Laurion ou à Santa-Eulalia au Mexique).

On peut distinguer :

a) Gisements particulièrement plombeux ;

b) Gisements particulièrement zincifères (calamine).

a) Gisements particulièrement plombeux

1. Type : zone de broyage. — Dans certaines zones de métallisation calcaire, il y a eu broyage de tout un compartiment souvent compris entre deux failles, puis métallisation des vides compliqués ainsi produits dans le calcaire.

α) **Eureka (Névada).** — Le gisement d'**Euréka** (*Névada*), découvert en 1864, a produit des résultats remarquables de 1869 à 1883 : 225.000 tonnes de plomb et 300 millions de francs d'or et d'argent. Ultérieurement le gisement s'est coincé et divisé et on a été obligé d'abandonner l'exploi-

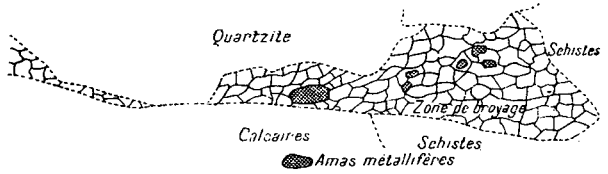


Fig. 134. — Carte schématique des gisements d'Euréka.

tation. Une zone de calcaire broyé s'y trouve intercalée entre deux failles ; elle est fortement minéralisée ; des altérations postérieures y ont encore concentré la minéralisation en amas ou chambres (*chambers*) qu'on a trouvés de distance en distance (fig. 134).

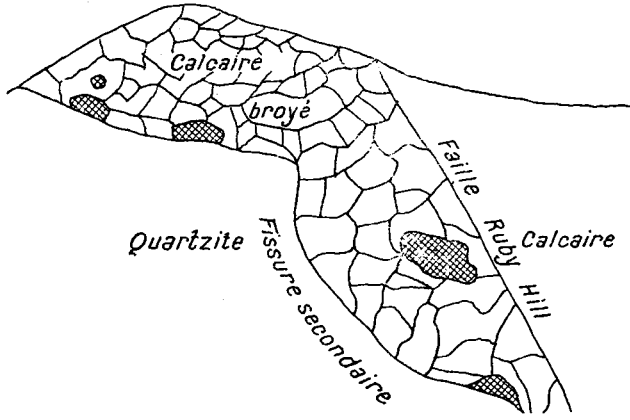


Fig. 135. — Coupe verticale de la mine Euréka.

Dans les parties supérieures du gisement, les minerais étaient complètement altérés ; les mineurs y distinguaient : le *carbonate rouge* (limonite avec anglésite et cérusite), le *carbonate jaune* (limonite avec anglésite

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

mimétèse ou wulfénite), le *minerai sulfuré* (agglomération de cristaux de cérusite grisâtres).

En profondeur, les sulfures se sont substitués progressivement aux carbonates et oxydes; il y a eu envahissement par les eaux, coincement de la zone de calcaire broyé et disparition totale du gisement.

Les phénomènes de remise en mouvement qui ont rassemblé les minerais en chambres et les ont transformés en oxydes et carbonates, semblent bien avoir agi par substitution au sein du calcaire et non par remplissage de grottes, de cavités déjà existantes.

β) **Sala (Suède).** — Le gisement de **Sala** est très analogue ; les minerais se sont disséminés au sein d'une zone de brèches dans des calcaires. C'est un des rares gisements suédois dont l'origine ait un caractère filonien.

2. Type : pénétrations compliquées en escalier. — Ce type présente des systèmes de ramifications en échelons, déterminées par les 3 plans de cassures (diaclases orthogonales et plans de joint) qui divisent habituellement un calcaire en parallélépipèdes et par quelques cassures verticales plus prolongées. Les intersections de cassures ont provoqué des colonnes d'enrichissement, des cheminées, des tuyaux tantôt verticaux, tantôt horizontaux, le long desquels les minerais ont pu se concentrer.

α) **Cumberland, Flintshire** (*Angleterre*). — Ce type de gisement est bien réalisé sur toute la bordure occidentale de la Chaîne Pennine dans les calcaires dinantiens. Il se rattache ici aux failles hercyniennes qui ont disloqué les terrains.

Les cassures ont des allures très variables ; les unes sont verticales, les autres parallèles ou perpendiculaires aux bancs. Les eaux ont suivi toutes ces cassures et les ont minéralisées ; il en résulte une allure très complexe analogue à celle des avens et des grottes. A certaines intersections se sont développées des « pipes », véritables tuyaux remplis de minerais. Il y a également concentration de minerais au contact de coulées de mélaphyres intercalées dans les formations carbonifères, ou au contact de bancs schisteux ou marneux.



Fig. 136. — Carte de la région plombo-zincifère des Etats-Unis

Les minerais sont des B. P. G. où la galène domine, parfois avec un peu de chalcopyrite. La gangue consiste en quartz ou calcite, fluorine et barytine. Il y a eu d'ailleurs des remises en mouvement qui ont produit des recristallisations de galène et de fluorine (amas concrétionnés, stalactites de fluorine dans des grottes).

β) **Bassin du Mississipi.** — Dans le bassin du *Mississipi* (**Joplin, Galena, Bonne-Terre**), on connaît des phénomènes analogues, au milieu

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

de calcaires siluriens, dévoniens ou carbonifères ; les gîtes présentent une allure en échelons très curieuse, en relation avec des grottes. Il y a association avec des hydrocarbures qui ont dû jouer un rôle dans la précipitation des sulfures et qui gênent parfois la préparation mécanique des minerais.

γ) **Mexique.** — Il existe des gisements analogues très riches au Mexique (**Mapimi, Santa-Eulalia**), dans des calcaires crétacés. Ils affectent l'allure de grands troncs avec des arborisations dans tous les sens. Certaine de ces grandes cheminées a plus de 40 mètres de diamètre. Il y a enrichissement au contact de calcaires et de roches imperméables.

3. Type : contact hétérogène et filons-couches. — Les contacts de calcaires fissurés et de terrains imperméables ont exercé sur la circulation des eaux métallisantes un effet de drainage et de localisation. De là des gîtes à apparence interstratifiée, sur lesquels les remises en mouvement ont pu agir.

α) **Leadville (Colorado).** — Le gîte de **Leadville** (*Colorado*) est l'un des plus importants du monde. On y a exploité d'abord l'argent et l'or, puis le plomb, puis le zinc, suivant les conditions industrielles.

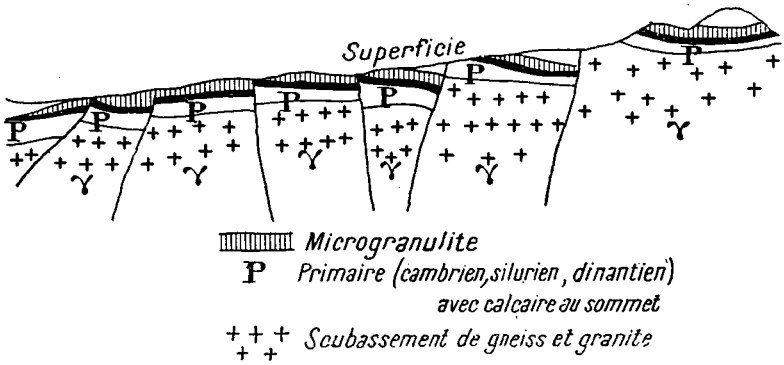


Fig. 137. — Coupe schématique du gisement de Leadville.

La production a atteint, en 1890, 46.000 tonnes de plomb. Elle a baissé depuis. Le gisement a produit en sept ans seulement, de 1877 à 1884, pour 500 millions de métaux (or, argent et plomb). Ces minerais sont très curieux au point de vue de leur allure.

Les terrains encaissants appartiennent au Silurien et au Carbonifère ; ils ont été, non plissés, mais gauchis et disloqués ; la formation métallifère s'est faite au contact de microgranulites et de calcaires dolomitiques dinantiens sous-jacents qui paraissent avoir été corrodés et remplis de minerais (voir fig. 137).

Les minerais primitifs ont été les B. P. G. ordinaires à galène dominante, avec chalcopyrite accessoire. On a trouvé ces sulfures complexes en profondeur. Mais ce sont les minerais altérés, extrêmement développés, qui ont fait la richesse du gisement. La galène est presque complètement transformée en cérusite, argentifère comme la galène elle-même ; la pyrite et le mispickel, aurifères, ont donné des oxydes de fer et

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

des ocres aurifères. Exceptionnellement on a de l'arsenic (qui accompagne l'or), de l'antimoine, du molybdène (à l'état de wulfénite dans les parties superficielles), du bismuth, du vanadium. La mimétèse et la pyromorphite ont été aussi de véritables minerais dans les parties hautes. La gangue comprend de la silice, de l'argile, des silicates de fer et de manganèse, de la barytine et de la strontianite ; ces deux derniers corps semblent dus à des concentrations secondaires. Tous les métaux de Leadville proviennent probablement des porphyres par une sorte de ségrégation périphérique : en effet, ces porphyres contiennent encore des traces résiduelles de ces métaux.

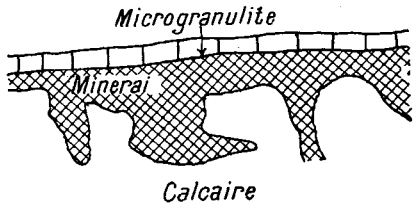


Fig. 138. — Schéma de la disposition des minerais à Leadville.

Des gisements du même type existent aussi dans l'*Utah* **(Bingham).**

β) **Bulgar-Maden** (*Asie Mineure*). — A Bulgar-Maden (Taurus cilicien), le gisement ressemble tout à fait à celui de Leadville. On trouve des microgranulites au milieu de calcaires dévoniens, avec formation métallifère au contact des deux terrains.

Il y a eu des circulations d'eaux superficielles, récentes ; elles ont transformé la galène en cérusite ; elles ont créé de véritables grottes, dont un tunnel qui traverse toute la montagne ; dans ces grottes il s'est fait un remaniement des minerais ; les uns ont été remaniés mécaniquement par les torrents circulant dans les grottes (galets de cérusite recouverts par des stalagmites), les autres sont dus à des dissolutions de sels métalliques et ont formé des stalactites de galène et de cérusite, etc. Ils sont incontestablement postérieurs. Les mispickels aurifères sont, comme à Leadville, profondément altérés.

b) Gisements principalement zincifères. Amas calaminaires

Les blendes donnent, en terrains calcaires, des amas calaminaires, la carbonatation du zinc étant due au milieu calcaire; en terrains non calcaires, elles ne donnent qu'un peu de calamine, la carbonatation résultant alors des circulation d'eaux superficielles, chargées de CO^2.

Les amas calaminaires sont généralement localisés au contact des terrains calcaires avec des terrains imperméables.

α) **Gisements de la Vieille-Montagne** (*Belgique*). — Le type des amas peut être pris dans l'Est de la Belgique, à la Vieille-Montagne. Il y a là, de Liége à Aix-la-Chapelle, une région qui a été plissée à l'époque hercynienne, puis arasée et recouverte par places par la transgression cénomanienne. Les terrains plissés comprennent, de haut en bas, du Westphalien, du calcaire dinantien, de la dolomie dinantienne, des calcaires et des schistes dévoniens. Ils sont recoupés par un système de fractures parallèles aux plis (S. W.-N. E.) ou transversales (N. W.-S. E.) avec métallisations

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

plombo-zincifères qui ont donné lieu à des amas calaminaires dans le Westphalien et les calcaires et dolomies du Dinantien, souvent au contact du Dévonien. Les gîtes, très riches autrefois, sont aujourd'hui épuisés. L'âge de ces gisements est assez bien déterminé et l'altération qui les a produits est nettement antérieure au Cénomanien, car la transgression crétacée les recouvre, sans être pénétrée par la

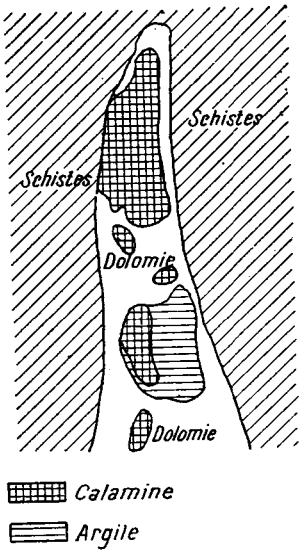


Fig. 139. — Coupe horizontale d'un gisement de la Vieille Montagne.

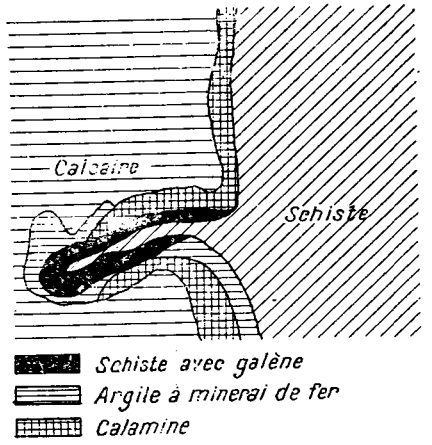


Fig. 140. — Coupe horizontale du gisement de Welkenraedt.

métallisation. L'imprégnation calaminaire à la **Vieille-Montagne** a peu à peu transformé tout le calcaire, sauf quelques noyaux restés stériles. Le calcaire au contact des amas a presque toujours été dolomitisé. Il y a, en outre, dans les gisements, passage progressif de la calamine à des terres calaminaires, l'argile provenant de la dissolution du calcaire. On trouve des géodes contenant des cristaux de smithsonite, calamine proprement dite, willémite, calcite et un peu de gypse ; la plus grande partie de celui-ci a disparu. L'oxydation des minerais a été complète, car la galène, la blende et la pyrite n'existent plus qu'à l'état de traces ; le zinc prédomine de beaucoup sur les autres métaux.

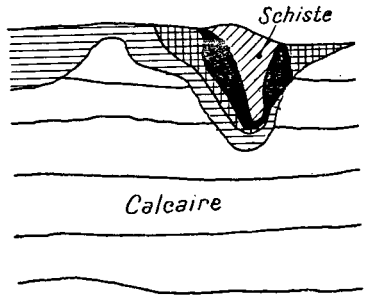


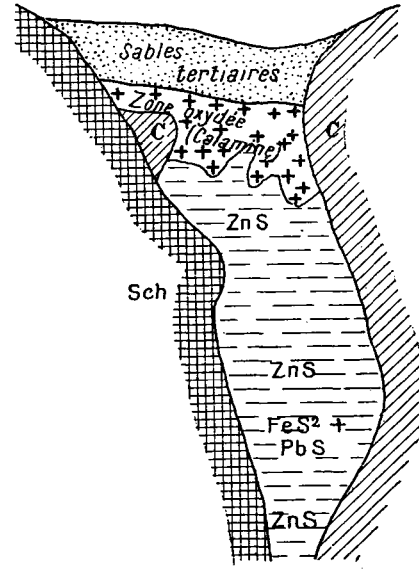
Fig. 141. — Coupe verticale du gisement de Welkenraedt.

Près de la Vieille-Montagne, à **Welkenraedt**, les gisements métallifères se trouvent au contact des schistes et des calcaires ; on y trouve, soit des argiles zincifères, soit de la calamine au voisinage des calcaires, soit de la galène au contact des schistes (fig. 140 et 141).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Il y a, dans la même région, à **Bleiberg,** des gisements où le plomb domine. Un filon a pu y être suivi sur 5 kilomètres dans le calcaire carbonifère et le terrain houiller. Il a un remplissage bréchiforme et une gangue de quartz et de calcite. Les minerais sont la galène et la blende ; mais, lorsque le filon entre dans le calcaire carbonifère, il donne lieu à la formation d'un amas de calamine. Postérieurement au remplissage, il s'est produit des phénomènes de réouverture ; il y a donc eu plusieurs métallisations.

Au voisinage de la Meuse, à **Engis,** un gisement calaminaire se relie au groupe de la Vieille-Montagne. C'est une poche verticale de B. P. G., encaissée entre des schistes et des calcaires sous un amas de sables et argiles tertiaires qui est venu sans doute remplir une dépression préparée par l'altération du gisement (fig. 142).



Sch. = *Schistes houillers.*
C = *Calcaire carbonifère.*

Fig. 142. — Coupe verticale du gîte d'Engis.

β) **Prusse rhénane, Westphalie.** — La zone des calamines belges se poursuit en Prusse rhénane, puis, au delà du Rhin, en Westphalie. En particulier, dans le Bassin de la Rhur, à **Iserlohn,** les amas se trouvent sur le contact des schistes de la Lenne (Lenneschiefer) et des calcaires à *Stringocephalus.*



Fig. 143. — Carte schématique du S. W. de la Sardaigne (Iglesiente).

γ) **Pays de Bade (Wiesloch).** — On y connaît des gisements de calamine, dans le Muschelkalk, remplissant des grottes ou des fentes verticales. Des

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

concrétions de calamine et de galène sur de vieux outils de l'époque romaine et du moyen âge témoignent des continuelles remises en mouvement.

δ) **Sardaigne.** — La région minéralisée (**Iglesiente**) (fig. 143) est située dans le Sud-Ouest. Il y a là un massif de granite (le massif d'Arbus), entouré de fractures qui ont donné naissance à des filons dont l'un est exploité dans la mine de galène de **Monte-Vecchio** ; puis, plus au Sud, des schistes et des calcaires siluriens. Au contact de ces groupes de terrains se trouvent les parties minéralisées avec les mines de **San-Giovanni, Monteponi, Malfidano.** La minéralisation est si constante qu'on a parlé quelquefois d'une couche minéralisée.

Les filons, très nombreux, de la région sont encaissés, soit dans les schistes et parallèlement à la schistosité (filon très riche de galène argentifère de Monte-Vecchio, aujourd'hui épuisé, dans lequel la teneur en argent a diminué en profondeur), soit dans les calcaires (calamines de Malfidano, galène de Nebida), soit dans des alternances de schistes et de calcaires (Monteponi) (fig. 144).

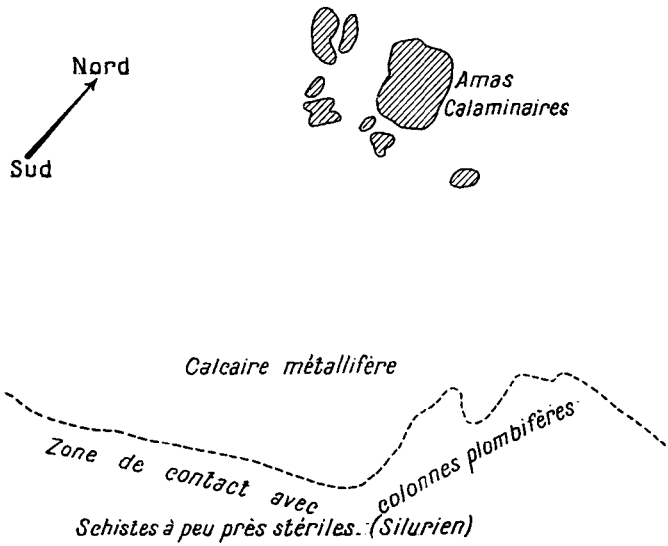


Fig. 144. — Plan schématique de la mine de Monteponi.

Monteponi est situé au contact du schiste et du calcaire. En pleine zone schisteuse, il n'y a pas de minerai ou peu de minerais ; par contre, au contact des schistes et du calcaire, tous les joints des terrains sont métallifères (colonnes plombifères). Plus au Nord se trouvent de grands amas calaminaires dans les calcaires.

ε) **Gard et Hérault.** — Sur le versant Est des Cévennes, la bordure S.-E. du Massif Central a été disloquée par des accidents tertiaires et a subi, à la même époque, une métallisation complexe de B. P. G. Tantôt le zinc, tantôt le plomb, tantôt le fer domine. On y a exploité des amas calaminaires.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les gisements des **Malines** (*Gard*) sont inclus dans des dolomies du Lias. Les circulations d'eau y ont produit des grottes, des abîmes, des galeries souterraines, avec formation de terres calaminaires et de calamine aux dépens de la blende, de cérusite aux dépens de la galène.

Un autre groupe a été exploité aux *Avinières* dans les dolomies du Lias.

On trouve d'autres amas calaminaires dans la *Drôme* (dans les calcaires oxfordiens), dans les *Alpes du Bergamasque* en Italie (dans les calcaires dolomitiques du Trias marin).

ξ) **Carinthie (Raibl).** — En Carinthie, au milieu des dolomies du Trias,

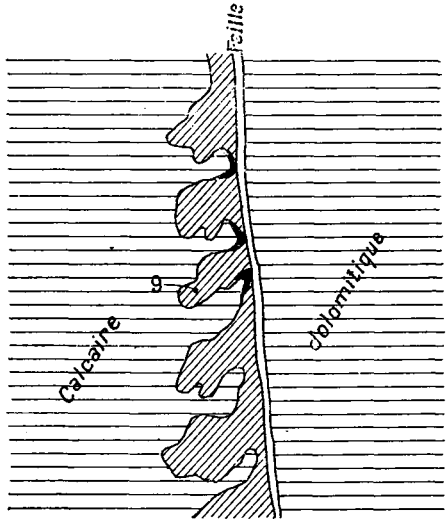


Fig. 145. — Remplissage de grottes à Raibl.
g. = Grottes avec remplissage de blende, galène, calamine et dolomie cristallisée

on rencontre des concrétions irrégulières de B. P. G. remplissant des vides creusés tout le long d'une faille (fig. 145). Certains géologues ont vu là uniquement un remplissage de grotte. Ce remplissage existe, en effet, mais il ne constitue pas le phénomène originel. Il est plus probable qu'il y a eu d'abord une venue métallifère ; puis, à une époque récente, les grottes se sont creusées et ont été remplies par des minerais empruntés à ces gisements antérieurs et remis en mouvement.

Des gisements d'un autre type nous montrent des amas de calamine encaissés dans le calcaire entre deux groupes de minerais sulfureux.

η) **Haute-Silésie** (fig. 146, 147). — Le plomb et le zinc y sont tellement mélangés qu'il y a eu des difficultés entre les concessionnaires de tel ou tel métal.

Il y a là, au milieu du Houiller, un grand synclinal de Trias où les minerais B. P. G. se sont épanchés entre deux calcaires du Muschelkalk.

On les y trouve sous deux formes : tantôt en calamine blanche, lorsque les sels de zinc se sont déplacés seuls à l'exclusion des sels de fer, transportés plus loin, dans la partie haute du gisement, tantôt en calamine rouge lorsqu'ils sont restés en place avec les sels de fer. En tout, la couche

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

calaminaire a une épaisseur de 15 à 20 mètres ; la teneur y a atteint, en surface, 50 % de zinc ; mais aujourd'hui les parties exploitées, plus profondes, où la galène et la blende tendent de plus en plus à prédominer,

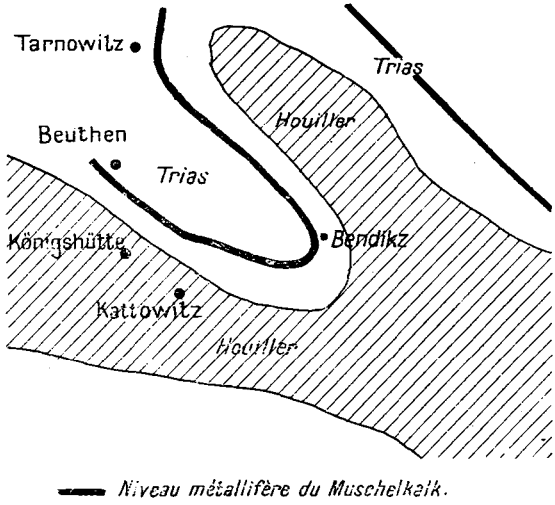


Fig. 146. — Carte schématique de la Haute-Silésie.

sont moins riches (10 %). Le fer a été souvent remanié et remplit des poches superficielles.

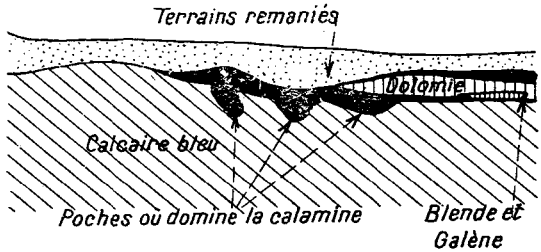


Fig. 147. — Coupe des gisements silésiens.

θ) **Laurion** (*Grèce*). — Ce gisement a une grande importance historique ; il a été redécouvert vers 1870. C'est une des régions où les formations de contact sont le mieux caractérisées. Il s'y trouve un certain nombre de plans de contact entre des calcaires et des schistes. Trois de ces plans sont métallisés par des B. P. G. altérés plus ou moins (surtout le 3e ; voir fig. 148). Le premier est fort peu développé. Les calcaires sont cristallins (calcaires métamorphiques marmoréens de l'Attique) et rapportés au Crétacé.

Quand on étudie en détail un de ces contacts, on voit que l'amas de minerais donne un certain nombre de poches au sein même du calcaire (fig. 149). Ces poches, « les griffons », se coincent très vite en profondeur :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

ce sont des diaclases, imprégnées de minerais ; elles ont donné lieu à des remises en mouvement ; on y trouve l'association de la galène, de la calamine, de la sidérose, des oxydes de manganèse. C'est là que se sont formées les magnifiques cristallisations du Laurion, de même que de longues baguettes de gypse qui résultent de l'action des sulfures sur le calcaire.

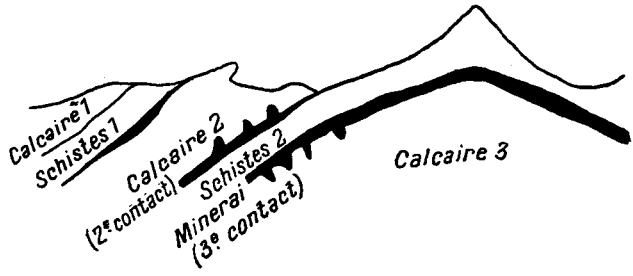


Fig. 148. — Coupe théorique du Laurion.

Le même type de contact se reproduit le long des filons d'eurites encaissés dans les calcaires.

La calamine provenant d'une substitution au calcaire conserve fré-

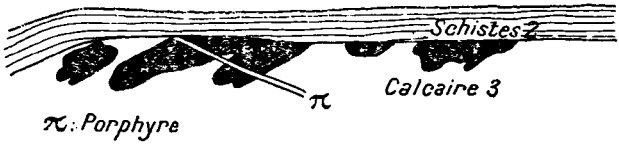


Fig. 149. — Détail du contact minéralisé du schiste et du calcaire montrant les griffons.

quemment la texture du calcaire ; elle peut donc être gréseuse, rubanée, etc. En outre elle a souvent une structure concrétionnée, mamelonnée, par les remises en mouvement au milieu des grottes.

Les Anciens ont exploité le gisement pour la galène argentifère. Dans les temps actuels, c'est pour la blende et surtout pour la calamine qu'il a été repris. En s'enfonçant aujourd'hui jusqu'au-dessous de la mer, on retrouve de la galène.

Dans les parties hautes du gîte, de « véritables pipes », cheminées horizontales ayant jusqu'à 25 mètres, étaient remplies de bioxyde de manganèse qui s'est épuisé très rapidement.

c) Le même type de gisements existe aussi à l'île de *Thasos*, en **Tunisie (Djebel Ressas)** et en **Algérie**.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXVI

ARGENT

1. Usages. — Métal *précieux, inaltérable, ductile,* doué d'un *vif éclat,* l'argent a un rôle économique bien connu ; mais il y a une très forte proportion d'argent qui a des usages industriels. On se sert d'alliage d'argent et de cuivre : 900 $^0/_{00}$ d'argent pour la *monnaie* et 800 $^0/_{00}$ (2^e titre) pour la *bijouterie* et *l'orfèvrerie.* On l'utilise aussi pour *l'argenture.*

L'usage de l'argent comme monnaie a mis ce métal dans une position spéciale. Les Grecs ne possédaient que cette monnaie. L'or n'a été introduit qu'au moment des communications avec l'Orient et la Macédoine. Chez les Romains, les deux métaux, or et argent, ont eu cours ensemble. Pendant le Moyen Age, les métaux précieux ont presque disparu ; ils ont repris leur rôle au moment de la découverte de l'Amérique ; le cours de l'argent a dès lors été très variable. L'argent valait 321 francs en 1500 et 230 en 1700.

Dans les deux premiers tiers du XIX^e siècle, le bimétallisme, qui consiste à avoir 2 unités monétaires, l'or et l'argent, 2 instruments de mesure, dont l'un est susceptible de variation par rapport à l'autre, a été de règle. Le rapport entre le cours de l'or et celui de l'argent a été considéré comme constant ; le prix de l'argent oscillait alors entre 215 et 220 francs. Toutefois, lorsqu'un des métaux baissait, il en résultait des troubles ; on accaparait l'autre métal et on se débarrassait du métal en baisse. Ainsi, de 1850 à 1860, les placers de Californie et d'Australie ont été mis en valeur et ont jeté sur le marché une grosse masse d'or dont le cours baissa ; les banques ont cru devoir prendre alors des mesures de défense contre l'afflux d'or anormal qui a duré à peine une dizaine d'années.

De 1860 à 1870, la valeur de l'argent a varié de 226 à 227 francs seulement ; les bimétallistes ont pu soutenir qu'il y avait un rapport, réglé par la nature aussi bien que par les lois, entre l'or et l'argent. Mais à partir de 1870, presque tous les pays ont renoncé à la monnaie d'argent comme unité monétaire ; l'Allemagne d'abord. Il en est résulté une grande baisse de l'argent qui a pris finalement l'allure d'un effondrement, malgré les efforts des Etats-Unis pour soutenir les cours :

1873.....	200 francs	1914.....	92 francs
1895.....	110 »	1920.....	80 fr.-or
1900.....	102 »	1932.....	38 à 50 fr.-or

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Actuellement, malgré les efforts des Silvermen américains qui voudraient relever les bénéfices de leurs mines, on a généralement renoncé à la monnaie d'argent, sauf comme monnaie d'appoint, et on se sert de l'or exclusivement, comme étalon monétaire, quand on n'utilise pas le papier-monnaie.

2. Statistique. — Dès que l'argent a cessé d'être considéré comme l'étalon monétaire et qu'il n'a plus eu que le rôle monétaire d'appoint, une crise s'est produite dans la production. Cette crise a amené la fermeture de nombreuses mines d'argent et, par suite, de plomb. Mais peu à peu, l'usage de l'argent en bijouterie a augmenté et les mines se sont rouvertes. D'ailleurs, les habitudes de thésaurisation de l'Orient, liées aux conditions économiques, draînent vers l'Extrême-Orient une bonne partie de l'argent.

La production a encore passé, de 1914 à 1929, de 5.000 à 8.000 tonnes :

1890....	4.380.000 kgr. d'argent	1918....	6.140.000 kgr. d'argent
1894....	5.550.000 » »	1925....	7.626.000 » »
1909....	7.069.000 » »	1928....	8.000.000 » »
1910....	7.267.000 » »	1929....	8.139.000 » »
1914....	4.996.000 » »	1930....	7.718.000 » »

Les variations tiennent à l'état économique général et, notamment, à l'état des récoltes dans les pays d'Orient. Une bonne année agricole détermine dans l'Inde un afflux d'argent pour la thésaurisation et, par conséquent, une augmentation temporaire de la production d'argent.

Les grands producteurs d'argent sont surtout le *Mexique* et les *Etats-Unis*. Ils viennent tantôt l'un, tantôt l'autre, à la tête de la production, selon que la politique est favorable à l'exploitation de l'argent dans l'un ou dans l'autre pays.

Le **Mexique** a doublé sa production de 1890 à 1910, où elle était de 2.250 tonnes. Après un fléchissement au cours des années de guerre (926 tonnes en 1916), il a eu, depuis 1920, une production régulièrement croissante (3.380 tonnes en 1929) ; toutefois cette production a légèrement baissé en 1930 (3.280 tonnes).

Ensuite viennent les **Etats-Unis**. C'est là que la crise du bimétallisme a été la plus intense (l'Ouest était partisan de l'argent, l'Est y était opposé). La production y est restée sensiblement la même avec des fluctuations entre 1.500 et 2.000 tonnes.

1890	1.790.000	kilogrammes
1914	2.253.000	»
1920	1.722.000	»
1925	2.058.000	»
1929	1.900.000	»
1930	1.580.000	»

Le **Canada** a pris un énorme développement au point de vue de la production de l'argent depuis la découverte du gisement de Cobalt, devenu un des plus grands du monde. Actuellement la production, après une baisse marquée au cours des années de guerre, est en voie d'augmentation progressive : mais elle n'est pas encore revenue au niveau d'avant guerre :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

1890	12.000	kilogrammes
1912	994.000	»
1920	414.000	»
1925	631.000	»
1929	720.000	»
1930	822.000	»

Le **Pérou** vient ensuite ; sa production a plus que doublée depuis 1918 et a pris un grand développement :

1890.....	66.000	kilogrammes	1920.....	274.000	kilogrammes
1914.....	287.000	»	1928.....	678.000	»
1918.....	304.000	»	1929.....	662.000	»

L'**Australie** a produit, avec la Nouvelle-Zélande, 324.000 kilogrammes en 1929 et 310.000 kilogrammes en 1930. Sa production s'était élevée à plus de 500.000 kilogrammes en 1912.

L'Inde et la **Birmanie** sont en voie de progression rapide :

1914.....	7.000	kilogrammes	1927.....	187.000	kilogrammes
1920.....	90.000	»	1929.....	227.000	»
1925.....	150.000	»	1930.....	220.000	»

La **Bolivie** présente des fluctuations violentes dans sa production :

1894.....	684.000	kilogrammes	1925.....	135.000	kilogrammes
1910.....	218.000	»	1926.....	181.000	»
1914.....	72.000	»	1927.....	168.000	»
1922.....	167.000	»	1929.....	150.000	»

L'**Allemagne** a une production d'argent retirée comme sous-produit de minerais importés et qui atteint 150.000 à 170.000 kilogrammes (155.000 en 1912 ; 172.000 en 1916 ; 103.000 en 1920 ; 162.000 en 1928 ; 172.000 en 1929).

Le **Japon** a produit, avec la Corée, en 1930, 180.000 kilogrammes (151.000 en 1914 ; 205.000 en 1918 ; 111.000 en 1924 ; 173.000 en 1925 ; 162.000 en 1929).

L'**Espagne** tire de ses mines de plomb de 75 à 100 tonnes d'argent chaque année, auxquelles il faudrait ajouter les minerais qu'elle exporte (143.000 kilogrammes en 1912 ; 86.000 en 1922 ; 103.000 en 1925 ; 78.500 en 1928 ; 83.000 en 1929).

L'**Amérique Centrale** donne de 80 à 100 tonnes (54.000 kilos en 1912 ; 106.000 en 1918 ; 62.000 en 1922 ; 109.000 en 1926 ; 87.000 en 1929 ; 120.000 en 1930).

Le **Chili**, 90 tonnes en 1927 et 49 en 1929 (30 tonnes en 1912) ;

Les **Indes néerlandaises**, 65 tonnes en 1930 (14 tonnes en 1912 ; 74 tonnes en 1925 ; 61 tonnes en 1929).

Enfin viennent de petites productions inférieures à 25 tonnes en 1929 :

Anciens Etats austro-hongrois	25 tonnes (66 en 1912).
Italie	16 tonnes (14 en 1912 ; 6 en 1922 ; 17 en 1927).
France	14 tonnes (64 en 1912 ; 44 en 1925 ; 20 en 1930).
Pologne.....	11 tonnes.
Norvège	10 tonnes (15 1 /2 en 1925).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Russie	9 tonnes (12 en 1928).
Grèce	7 t. 5 (25 en 1912).
Turquie	7 tonnes (1928).
Colombie	4 tonnes (1927) (26 en 1912).
Algérie	4 tonnes.
Tunisie	3 tonnes.
Maroc	1 t. 6.
Grande-Bretagne	1 tonne (4 t. 1 /2 en 1914).

En résumé, l'*Amérique du Nord* fournit près de 6.000.000 kilogrammes d'argent, c'est-à-dire les 3 /4 de la production mondiale [Mexique = plus des 2 /5 ; Etats-Unis + Canada = 1 /3] ; l'*Amérique du Sud* : plus de 800.000 (1 /9 de la production mondiale) ; l'*Asie*, 450.000 ; l'*Europe*, 350.000 ; l'*Afrique*, 40.000 (venant surtout du Transvaal).

3. Détails historiques sur la production. — Aux **États-Uuis,** la production d'argent vient presque entièrement de l'Ouest. Les placers aurifères de *Californie* ont été découverts en venant de la côte ; puis on a remonté les pentes des montagnes en cherchant l'or ; vers 1860, on a trouvé dans le *Nevada* des mines où l'argent est prédominant (Comstock, Euréka, etc.). Le mouvement d'émigration s'est ensuite continué et a atteint la région de l'*Utah*, où la législation des Mormons défendait l'exploitation des mines (jusque vers 1880). On a exploité ensuite dans le Nord, le *Montana* ; dans le Sud, l'*Arizona*, le *Colorado* et le *Nouveau-Mexique*. Les premiers gisements trouvés ont été rapidement épuisés, au moins en apparence. Mais à la suite de la découverte de procédés plus économiques, on a pu reprendre certaines mines abandonnées en traitant des minerais pauvres.

L'histoire du **Mexique** a été sensiblement la même. On a traité d'abord les minerais amalgamables ; vers le XVIII^e^ siècle, on est arrivé au niveau hydrostatique ; on a dû lutter alors contre la venue des eaux au moyen d'énormes tunnels ; puis la guerre civile a éclaté et a arrêté les exploitations. Vers 1860, on a repris les anciennes mines en profondeur, en traitant les minerais sulfurés (600 grammes à la tonne) au lieu des minerais de cémentation superficiels (2 à 3 kilogrammes à la tonne) et on a organisé toutes ces mines d'une façon moderne.

En **Australie,** la découverte du gîte de *Broken Hill* a eu lieu en 1883 ; les minerais ont été d'une richesse considérable jusque vers 1895 (1,2 à 1,5 kilogramme à la tonne) : il s'agissait de kaolins argentifères. En arrivant au niveau hydrostatique, il y a eu appauvrissement notable ; une grève a eu lieu à ce moment. La mine a été alors abandonnée aux mineurs. Sa production a beaucoup baissé. Actuellement elle est reprise avec des méthodes nouvelles mais reste peu considérable.

4. Minerais. — *a*) MINERAIS COMPLEXES. — La plus grande partie de l'argent vient de minerais où domine un autre métal (blende, galène, chalcopyrite) et de leurs produits de décomposition (ocres, terres, boues).

On peut les exploiter pour l'argent jusqu'à une teneur minima de 200 grammes à la tonne environ.

Presque toutes les *galènes* sont argentifères et contiennent des teneurs courantes de 300 à 500 grammes à la tonne. Jusqu'à des teneurs de 1 kg.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

à 1 kg. 1/2 à la tonne, l'argent est invisible et se trouve inclus dans les clivages de la galène. Au-dessus de ces teneurs, l'argent commence à s'isoler et à devenir visible au milieu de la galène. On a remarqué souvent que celle-ci est d'autant plus argentifère qu'elle est à grains plus fins.

Dans les *minerais de cuivre*, où la teneur en cuivre est généralement faible (2 %), l'argent semble en apparence exister en très petite proportion (100-150 grammes à la tonne de minerai). Toutefois, si on rapporte la quantité d'argent qu'ils renferment au poids de chalcopyrites théoriques qu'on pourrait obtenir avec le cuivre contenu dans ces minerais, la teneur apparaît beaucoup plus élevée et tout à fait comparable à celle des galènes argentifères.

Dans les *blendes*, la quantité d'argent est plus faible et fait souvent défaut.

Enfin il existe des *pyrites argentifères* contenant de très faibles quantités d'argent (15 à 30 grammes à la tonne), fréquemment associé à l'or, et où la teneur en or est supérieure à celle de l'argent.

Dans ces différents cas, l'argent vient du raffinage et est obtenu comme sous-produit après le traitement des minerais.

b) MINERAIS D'ARGENT PROPREMENT DITS. — On trouve, en outre, des minerais d'argent proprement dits qui jouent un rôle secondaire.

L'*argent natif* cesse toujours en profondeur. Cependant, à Kongsberg (Norvège), il se maintient jusqu'à 750 mètres.

Les *minerais sulfurés* (sulfures, sulfo-arséniures et sulfo-antimoniures) jouent un rôle de plus en plus faible. L'*argyrose* (Ag^2S), les *argents noirs et rouges* : *polybasite* ([Ag, Cu]$^9SbAsS^6$), *argyrythrose* (Ag^3SbS^3), *proustite* ($Ag^6As^2S^6$), ont une tendance à disparaître quand on s'enfonce. Ils doivent subsister à l'état d'inclusions microscopiques dans d'autres minerais.

Les *chlorures*, *bromures*, *iodures* se trouvent en affleurement et disparaissent à quelques mètres de la surface : *cérargyrite* ou *argent corné* (AgCl), *bromargyrite* (AgBr), *iodargyrite* (Ag I).

Il y a donc deux grands groupes de minerais d'argent :

minerais subordonnés aux B. P. G.,

minerais à minéraux isolés d'argent.

5. Géologie des gisements. — Les gisements argentifères sont surtout des types filoniens : ce sont presque toujours des cas particuliers de filons B. P. G. C. argentifères. Les autres types métallogéniques n'existent plus pour ce métal. Cela tient à la facilité avec laquelle l'argent est déplacé dans ses gisements et remonte vers la surface. Il y a eu, par suite, des remises en mouvement qui ont pu se produire dès la mise en place des roches primitivement argentifères et qui se sont continuées indéfiniment. Ces modifications ont eu pour effet d'enrichir les zones superficielles.

VARIATIONS DES FILONS D'ARGENT EN PROFONDEUR. — Un filon d'argent montre généralement trois zones successives :

1° La *zone d'oxydation* en surface où sont localisés les minerais chlorurés, bromurés, iodurés, avec argent natif. Les roches y sont décomposées, transformées en argile. Les substances accompagnant l'argent y sont oxydées : sels de fer peroxydés, sels de plomb passant à l'état de carbonate,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

cuivre à l'état de cuprite, de chrysocolle, d'azurite, de malachite. On y trouve donc, sur une hauteur variable (15 à 20 mètres), des hématites, qui peuvent être associées à de l'or natif, des terres et ocres ferrugineuses, des cérusites argentifères, avec cérargyrite et argent natif.

2° Au-dessous de cette zone, la *zone de cémentation* qui subsiste jusqu'au niveau hydrostatique. Dans les pays à fort relief (Andes), elle est très développée, sur plusieurs centaines de mètres de hauteur. La teneur en cuivre et en argent y est accrue ; l'oxygène y manque à peu près totalement. L'argent s'y est concentré sous la forme de sulfure (argyrose), de sulfo-arséniures et surtout de sulfo-antimoniures (argent noir et argent rouge). Le cuivre s'y trouve à l'état d'érubescite, de covelline, de cuivre gris, de chalcopyrite (minerais irisés appelés Pavonados). Les parties les plus riches se rencontrent à la base à la limite du niveau hydrostatique (*bonanzas*), où l'on trouve des minerais accumulés dans des sortes de chambres (*chambers*), pouvant atteindre 50 mètres × 50 mètres. Dans cette zone de cémentation, les teneurs de 5 à 10 kilos à la tonne sont fréquentes.

3° La *zone profonde des sulfures complexes* où la teneur d'argent dépasse rarement 6 0 grammes à la tonne. Dans cette zone, les minerais d'argent proprement dits disparaissent et l'argent est disséminé en petite quantité dans la blende, la galène et la pyrite. Cette 3e zone se trouve au-dessous du niveau hydrostatique.

Dans l'Ancien-Monde, les zones d'oxydation et de cémentation des filons argentifères sont vidées, épuisées depuis longtemps. Dans le Nouveau-Monde, on travaille encore souvent sur la zone de cémentation.

Parfois les phénomènes d'altérations se prolongent assez loin en profondeur : à Kongsberg par exemple, jusqu'à 7 et 800 mètres ; mais ce sont des cas tout à fait exceptionnels que des faits topographiques ne suffisent pas à expliquer et pour lesquels on peut invoquer des affaissements de compartiments autrefois superficiels.

Gangues. — La gangue des filons argentifères est le plus généralement quartzeuse. Parfois elle est constituée par de la calcite qui peut être due à des emprunts faits aux roches encaissantes, lors des remises en mouvement, et aussi à des venues de fumerolles carbonatées, comme il apparaît à Kongsberg où la gangue de calcite subsiste, même au-dessous du niveau hydrostatique. Les gisements quartzeux de minerais complexes argentifères s'accompagnent, soit d'or, soit de cuivre. Enfin, l'argent peut être associé au cobalt avec une gangue de quartz ou de calcite ; de là la division que nous allons suivre dans cette étude :

1° Filons quartzeux plombo-argentifères ;
2° Filons quartzeux cupro-argentifères ;
3° Filons cobalto-argentifères ;
4° Filons d'argent à gangue de calcite.

6. Gisements. — Nous ne reviendrons pas ici sur un certain nombre de gisements qui ont été étudiés précédemment en tant que filons B. P. G. ou B. P. G. C., comme Leadville (Colorado), Eureka (Nevada), Montana et Arizona, Laurion (Grèce), mines de plomb d'Espagne, etc. Nous ne retiendrons que les filons qui sont plus spécialement argentifères.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

I. — FILONS QUARTZEUX PLOMBO-ARGENTIFÈRES

Ces filons plombo-argentifères sont un cas particulier des filons B. P. G. où l'argent a une teneur assez forte et où la galène domine. Ils renferment souvent un peu d'or. La plupart sont en relation avec des roches éruptives récentes.

Gisement du Comstock (*Nevada*). — Il a été découvert en 1859 par deux mineurs irlandais, qui moururent plus tard : l'un fou, l'autre de misère. C'est l'un des plus grands filons du monde. Il a joué un rôle important de 1860 à 1880. Dès 1870, sa production était de 70 millions ; peu après, elle s'élevait à 150 millions, puis à plus de 200 millions. C'est dans la période de 1870-1874 que furent trouvées les principales bonanzas, ensuite la teneur diminua. Après 1876, en s'approfondissant, on se heurta à de grosses difficultés : l'abondance des eaux et la température elevée au fond de la mine. On dut pratiquer un tunnel de 7 kilomètres de long pour l'écoulement des eaux. Pour lutter contre la forte augmentation de température (degré géothermique de 10 mètres), qui atteignit 77° à 700 mètres de profondeur, il fallut faire arriver une pluie d'eau froide sur le front de taille, distribuer de fortes quantités de glace aux mineurs, diminuer considérablement les heures de travail. Le Comstock, dans ces conditions, vit sa production diminuer rapidement. Il a fourni pour plusieurs milliards de métaux dont les 9/10 ont été donnés par des minerais à basse teneur et non par les bonanzas.

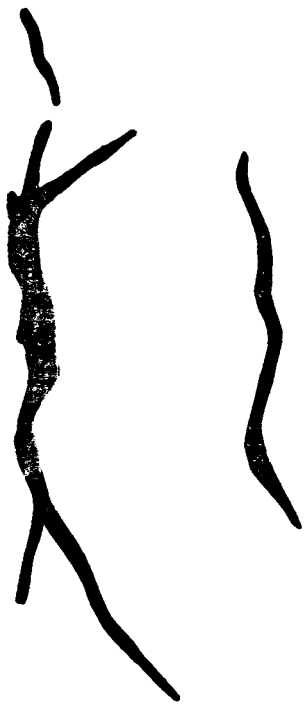


Fig. 150. — Plan schématique des deux principaux filons du Comstock (Nevada).

C'est un filon-faille, entre deux masses de roches volcaniques, diorites et diabases, qui ont joué l'une par rapport à l'autre. Il présente au milieu un élargissement et se termine à ses extrémités, à la partie haute et à la partie basse par un éparpillement de bifurcations. En outre, d'autres bifurcations latérales se branchent sur la cassure principale.

Le remplissage est formé de quartz bréchiforme, avec sulfures complexes argentifères et, exceptionnellement, un peu de calcite.

En partant du haut, on a trouvé : la zone d'oxydation habituelle (argent natif, chlorure) ; plus bas, la zone de cémentation avec des sulfures et des sulfosels (argyrose, stéphanite, trétraédrite, polybasite, proustite, cérusite, cuprite, or natif, etc.).

Certaines bonanzas ont donné des minerais valant jusqu'à 4.000 francs la tonne. L'une d'elles a produit à elle seule 215 millions de francs.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

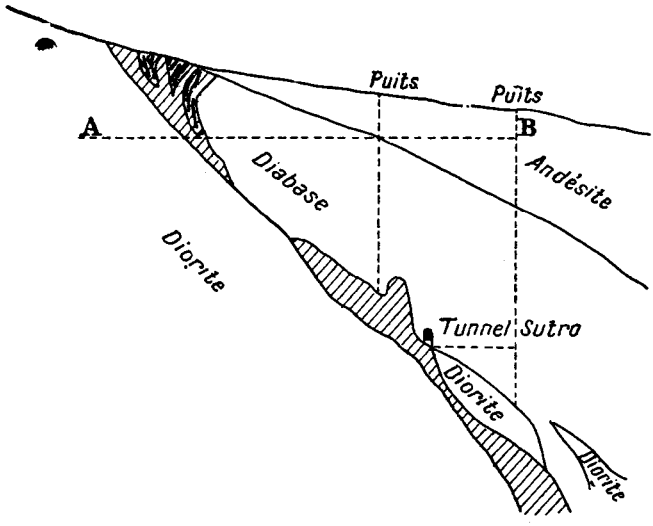
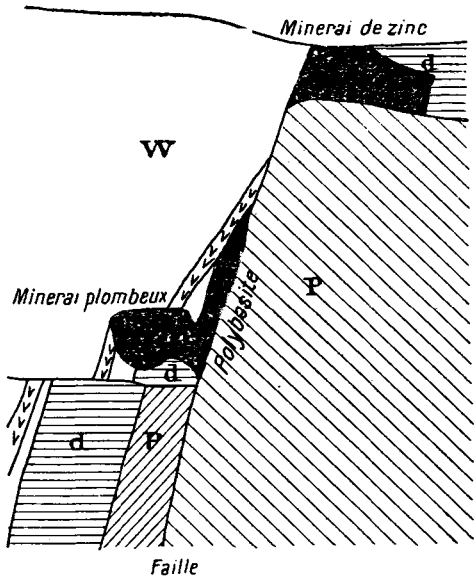


Fig. 151. — Coupe du filon du Comstock (Nevada).



P = Terrains primaires (Cambrien, silurien, dévonien).
d = Calcaire dolomitique de Léadville.
W = Formation de Weber (carbonifère, calcaire et schistes calcaire).
<<<< Microgranites.

Fig. 152. — Coupe du gisement d'Aspen (Colorado).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Gisement d'Aspen (*Colorado*), — Épuisé aujourd'hui, il a eu des productions très fortes qui se sont élevées jusqu'à 130.000 kilogrammes d'argent et même, en 1892, jusqu'à 250.000 kilogrammes. Au total, on en a retiré 3.000 tonnes d'argent, en même temps qu'un peu d'or et du plomb.

Le district d'Aspen présente un réseau très compliqué de failles formant deux systèmes à peu près orthogonaux et intéressant le granite et les terrains primaires, surtout carbonifères (calcaires de Leadville). En outre, on y trouve des microgranites.

Les minerais se présentent sous la forme d'amas discontinus le long des failles, particulièrement dans le calcaire carbonifère de Leadville, postérieurement dolomitisé (fig. 152). Ils cimentent les brèches produites par l'ouverture des failles et sont abondants à la rencontre de deux failles principales avec des failles transversales, surtout quand celles-ci sont presque horizontales. Le gîte a donc des analogies avec celui de Leadville.

Au voisinage de la surface, les minerais sont des oxydes, sulfates et carbonates de plomb et de zinc, dérivant des sulfures qui restent à l'état de traces (cérusite, anglésite, oxydes de fer, cuprite), avec de l'argent natif.

Dans la zone de cémentation, les B. P. G. accompagnent les minerais d'argent proprement dits. A côté de la galène argentifère, de la blende, quelquefois de la pyrite, de la chalcopyrite et du cuivre gris, on trouve de la polybasite, un peu d'argent natif et des traces de manganèse. La gangue est constituée par du quartz, rarement de la dolomie et de la barytine.

En profondeur subsistent seuls les minerais complexes.

Gîtes du Mexique. — Ces gisements sont les plus beaux du monde. Ils

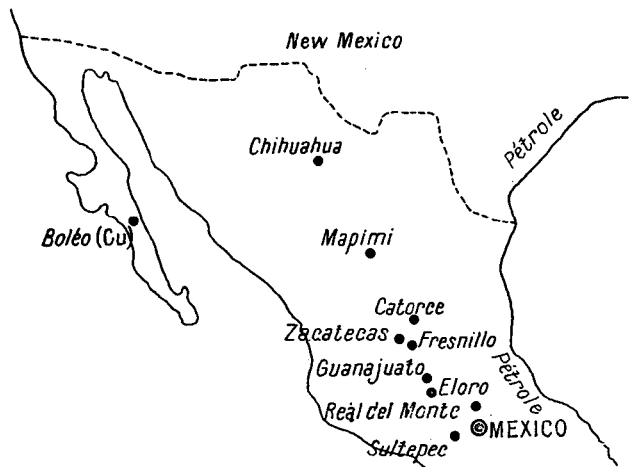


Fig. 153. — Carte des principales mines d'argent du Mexique.

sont situés sur un grand plateau de 2.000 mètres d'altitude qui occupe une grande partie du Mexique et qui est dominé par des volcans et coupé à l'Est et à l'Ouest par des pentes très brusques (fig. 153). Ils sont exploités depuis le XVI^e^ et le XVII^e^ siècles ; ils ont été repris récemment en même temps qu'on faisait des recherches plus au Nord. Les premiers gisements exploités

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

furent ceux des *environs de Mexico* et c'est beaucoup plus tard que fut mis en valeur le centre de *Mapimi*.

A l'origine, l'extraction des métaux précieux se faisait par amalgamation. Le mercure nécessaire était fourni par l'Espagne qui le faisait payer très cher ; puis il fut cherché dans la Californie, alors mexicaine.

Les filons occupent des fractures de dislocation de grandes dimensions et offrent généralement la structure bréchiforme.

Les minerais sont des minerais auro-argentifères avec gangue quartzeuse : la calcite y joue un rôle très restreint ; la barytine y est assez rare ; on cite peu de fluorine ; dans certains endroits, les silicates et carbonates de manganèse prennent un certain développement. Ce qui fait l'intérêt théorique de ces gisements mexicains, c'est la relation très nette qu'ils présentent avec des roches éruptives récentes (andésites pyroxéniques et amphiboliques traversées par des venues de rhyolithes) ; c'est aussi les variations des filons en profondeur. La zone superficielle, où prédominent l'argent natif, les bromures et les chlorures d'argent, est d'une richesse médiocre ; au-dessous vient la zone riche des Bonanzas où se concentrent les sulfures d'argent ainsi que les argents rouges et noirs ; plus profondément, les gîtes s'appauvrissent graduellement avec remplissage de quartz et de B. P. G.

Le gisement de **Guanajuato**, exploité dès le début de l'occupation espagnole, a produit avec une seule mine plus de trois milliards de francs-or. Ce fut longtemps la mine la plus profonde du monde. La Veta

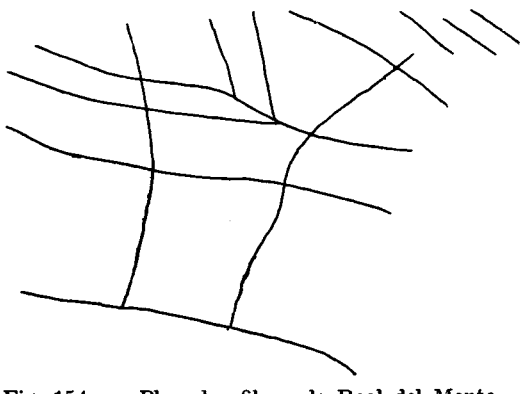


Fig. 154. — Plan des filons de Real del Monte.

Madre, le filon-mère, peut être suivie sur 5 kilomètres de long ; comme le Comstock, c'est un filon-faille à remplissage quartzeux auro-argentifère, contenant un peu de fluorine et de barytine, avec des bonanzas dispersées. Outre les minerais déjà signalés, on trouve dans ce gisement des traces de cinabre dans les zones hautes et de molybdénite. L'étain, par une association plus inattendue, se rencontre dans les alluvions.

A **Real del Monte** (fig. 154), exploité surtout depuis la dernière moitié du XVIII^e^ siècle et repris récemment, les filons sont formés d'une brèche quartzeuse avec calcite rare, sulfure d'argent et sulfo-antimoniures.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

L'argent est associé à la rhodonite. Les filons présentent nettement deux directions orthogonales.

On trouve un type analogue à **Catorce** (3 kilomètres de longueur × 12 mètres de puissance), avec les mêmes minerais à gangue quartzeuse,

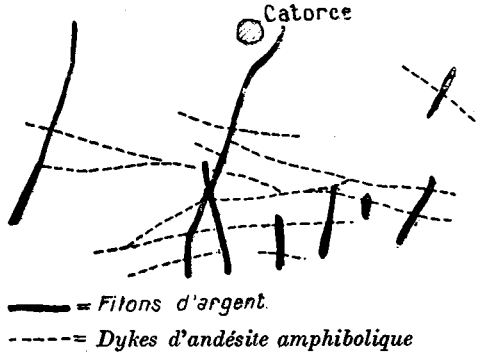


Fig. 155. — Plan des filons de Catorce.

passant en profondeur à des minerais complexes (fig. 155). Les filons argentifères sont nettement parallèles entre eux et perpendiculaires à des dykes d'andésite qui sont antérieurs aux filons. Il y a enrichissement au contact des andésites.

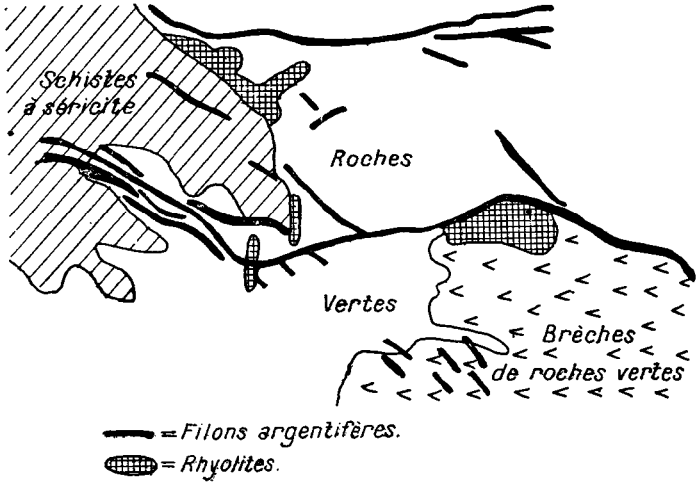


Fig. 156. — Carte du district de Zacatecas.

A **Zacatecas** (fig. 156), le district, découvert en 1548, a donné plus de 4 milliards de francs-or de métaux précieux en trois siècles. En 1885, plus de 15.000 mineurs travaillaient encore.

Les filons ont une direction Est-Ouest avec nombreuses sinuosités et

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

bifurcations, donnant l'impression d'un commencement de torsion. Le remplissage comprend du quartz parfois améthyste, un peu de calcite, de la fluorine, des B. P. G. C., de l'érubescite, des argents noirs et rouges. La zone d'oxydation, tantôt est très superficielle, tantôt descend à 150 mètres ; elle contient parfois un peu d'or natif.

Des types analogues se retrouvent dans l'*Amérique du Sud*, en **Colombie**, au **Pérou.** On y voit surtout apparaître le type cuivreux (Voir plus loin).

En *Europe*, à **Schemnitz** (Tchécoslovaquie) (fig. 157), dans les contreforts des Tatras, on connaît des gisements analogues à ceux du Nouveau-

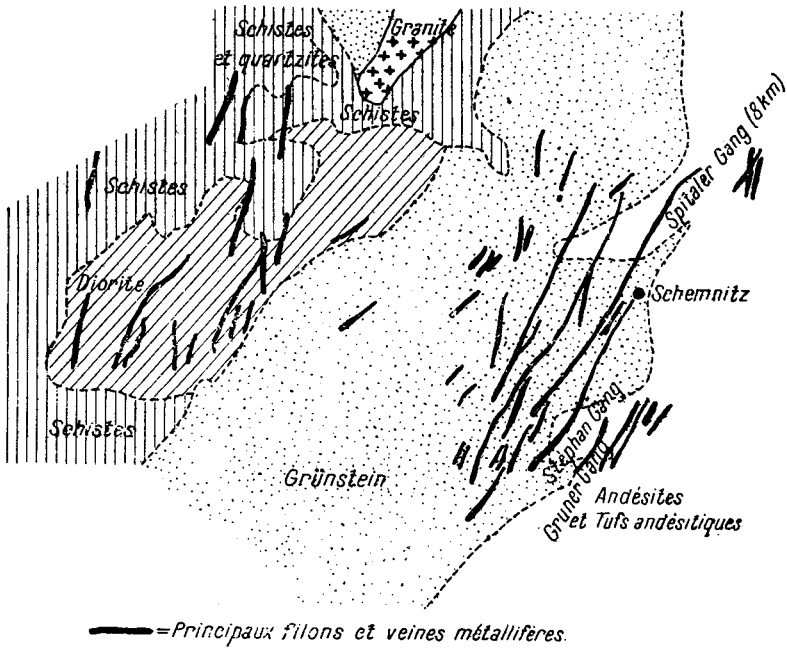


Fig. 157. — Carte géologique schématique du district de Schemnitz.

Monde, constitués par des filons de quartz auro-argentifères, intercalés dans des roches éruptives tertiaires : andésites pyroxéniques, diorites, diorites quartzifères, andésites amphiboliques, rhyolithes. Ces roches éruptives sont coupées par des failles et pénétrées par des venues de basaltes pliocènes, qui, comme il arrive dans les grands champs métallifères américains, sont postérieures à la métallisation.

Les roches éruptives, surtout les andésites, ont été fortement altérées par des phénomènes en rapport avec les venues métalliques et ont donné des propylites (Grünstein).

On exploite à Schemnitz 7 grands filons principaux, parallèles entre eux, se composant chacun, non pas d'une fente unique, mais d'un réseau de fissures se bifurquant, se séparant, se réunissant et comprenant entre elles des intervalles de propylite. Ces filons ainsi définis peuvent donc

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

présenter des largeurs considérables (40 mètres) ; ils n'ont pas de salbandes et offrent l'aspect de filons bréchiformes. Il est visible que l'on a affaire à des zones de roches brisées ayant offert à la circulation des eaux minéralisantes un passage facile et dont tous les éléments sont réunis par un ciment de minéraux.

La structure des filons diffère légèrement selon la nature de la roche encaissante : dans les andésites propylitisées, ils sont beaucoup plus ramifiés et contiennent de la calcite ; dans les diorites, les veines sont moins nombreuses et plus nettes.

La gangue consiste en quartz avec des éléments plus récents (calcite, sidérose, dialogite, barytine) ; le quartz est parfois coloré en rouge brun par de l'oxyde de fer, riche en or, et imprégné de galène, blende, pyrite : on lui donne alors le nom de *sinople* et il caractérise les parties qui ne sont pas exclusivement argentifères. Au contraire, les minerais d'argent sont accompagnés de calcite et d'un quartz hyalin appelé *glos*.

Les minerais sont des B. P. G. C. argentifères, avec pyrite aurifère, des minerais d'argent proprement dits (argent natif, argent noir, argent rouge), un peu d'or natif, accessoirement du cuivre gris, de la stibine et du cinabre. La proportion de l'or à l'argent est de 1 à 23.

Tous ces filons datent de la fin du Miocène ; ils sont antérieurs aux basaltes pliocènes.

II. — FILONS QUARTZEUX CUPRO-ARGENTIFÈRES

Ce sont encore des filons B. P. G. argentifères et à gangue quartzeuse, mais où le cuivre prend un développement important en même temps que l'argent. Ils sont parfois aussi aurifères.

Au milieu des Montagnes-Rocheuses, dans le *Montana* (**Région de Butte-City**), il existe un système de filons d'argent, de cuivre et d'or fournissant des minerais traitables par la fusion ou l'amalgamation et en relation avec des rhyolithes. C'est tantôt le cuivre, tantôt l'argent, tantôt l'or qui prédomine. Les mines de l'*Arizona* et du *Nouveau-Mexique* restent du même type.

Ce type se poursuit enfin dans l'**Amérique du Sud.**

Les plaines cultivables du bassin de l'Amazone et de l'Argentine ne possèdent pas de minerais. Les massifs de l'Est (Brésil, Guyane) contiennent seulement des minerais aurifères en imprégnations diffuses dans une plate-forme primitive. Mais, à l'Ouest, se trouve une zone plissée d'âge tertiaire, se reliant aux plissements de l'Amérique du Nord. Là des filons tertiaires très riches se rencontrent en *Colombie*, en *Bolivie*, dans le *Chili* et dans une partie du *Pérou*. On a reconnu sur le haut plateau bolivien de grandes mines d'étain, bismuth, etc., avec d'énormes richesses en argent qui disparaissent en profondeur (Huanchaca, Potosi, etc.), pour faire place aux minerais de cuivre, bismuth et étain.

Dans le plus grand nombre des mines du **Pérou** se reproduisent les mêmes variations en profondeur, déjà rencontrées au Mexique, qui sont dues aux phénomènes d'altération au-dessus du niveau hydrostatique. Par exemple, sur le **Cerro de Pasco**, on a distingué plusieurs sortes de minerais :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

1° Les *Pacos* ou *Cascajos*, à la partie supérieure ; ils correspondent aux Colorados du Mexique. Minerais rouges, très chargés d'oxyde de fer, accompagnés d'argent natif. La teneur moyenne en argent est de 500 grammes à la tonne ;

2° Les *Bronzes* qui se rencontrent sous les Pacos et tirent leur nom de la présence des pyrites de fer et de cuivre, celles-là plus abondantes que celles-ci. Si la pyrite de fer est pure, le minerai est pauvre en argent et



Fig. 158. — Carte minière de l'Amérique du Su .

contient souvent de l'or. Quant à la pyrite cuivreuse, elle est plus ou moins riche en argent suivant la quantité de cuivre qu'elle contient ;

3° Les *Pavonados* qui sont encore plus profonds (partie inférieure des gisements) ; ils sont en grande partie constitués par des sulfosels et donnent 8 à 9 kilogrammes d'argent à la tonne. Parmi ces pavonados, on rencontre l'érubescite, le cuivre gris, souvent très riche en argent et qui a fourni jusqu'à 24 kilogrammes à la tonne ;

4° Les *minerais plombeux*, au-dessous du niveau hydrostatique ; la galène argentifère a une teneur en argent qui varie entre 1 et 5 kilogrammes à la tonne.

Tous ces minerais se trouvent habituellement dans des filons à gangue quartzeuse, formant souvent saillie à la surface du terrain, saillies appe-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

lées crestones. Dans le quartz vacuolaire ou compact, les minerais d'argent sont répartis en veines ou en colonnes, formant des amoncellements considérables (désignés au Mexique sous le nom de *bonanzas*.).

En **Bolivie,** les gisements argentifères se trouvent à une forte altitude. L'ancienne et célèbre mine du **Potosi** est à 4.000 mètres d'altitude ; activement exploitée depuis 1571, elle fut abandonnée à plusieurs reprises, notamment en 1810. Elle fut rouverte en 1854. Aujourd'hui c'est pratiquement un gîte d'étain. Le centre de Potosi aurait produit depuis l'origine près de 6 milliards d'argent (francs-or).

La mine d'**Huanchaca,** dans le département du Potosi, se trouve dans des andésites et des trachytes. Le filon principal a une puissance qui varie entre 1 et 3 mètres ; dans le sens vertical, il présente des renversements d'inclinaison en S ; les minerais sont répartis par colonnes riches séparées par des parties stériles. Le remplissage est formé de barytine à la partie supérieure ; au-dessous, de quartz. Dans les parties hautes, le minerai principal a été le cuivre gris argentifère associé à la galène, à la blende, à la stibine et à une série de métaux rares (gallium, germanium, iridum, etc.).

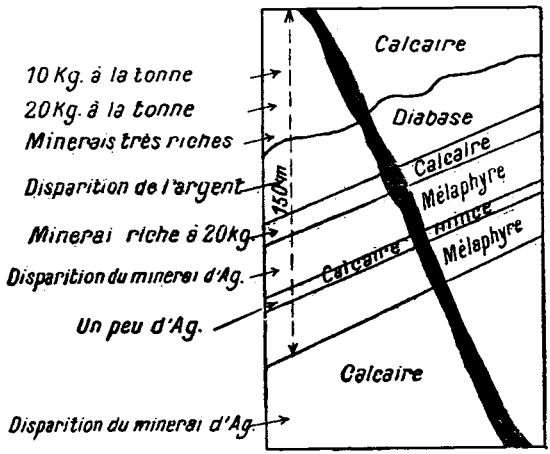


Fig. 159. — Coupe du filon de Chañarcillo.

Dans l'**Argentine,** qui, malgré son nom, contient peu de minerais d'argent, les mêmes types de gisements se poursuivent le long de la chaîne andine en relation avec des roches éruptives tertiaires. La plupart sont encore inexploités ; leur production se borne à peu de chose. On observe dans ces filons un enrichissement des zones superficielles. [Filons de la province de **Rioja** (Famatina), de la province de **Mendoza,** de la **Sierra de Cordoba**, etc.]

Au **Chili,** existent aussi, au milieu des terrains calcaires de la haute cordillère, fracturés par des roches éruptives, d'importants gisements argentifères faiblement cuivreux. Ces gisements, exploités dans la première moitié du XIX^{e} siècle, sont repris actuellement. Ils présentent des phénomènes de cémentation très développés :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

1° En surface, on a les métaux chauds (*Metales calidos*) facilement amalgamables : argent natif, chlorures et bromures d'argent, mélangés à une argile ferrugineuse et parfois à de la malachite.

La *Plata Verde* (argent vert), très commune au Chili, est donnée par le mélange du chlorure et du bromure.

L'argent natif est, soit en parcelles très fines, rugueuses au toucher, soit en blocs de plusieurs kilogrammes.

2° Au-dessous, vers 80 à 150 mètres, commencent les métaux froids (*metales frios*) non amalgamables : d'abord les *mulatos* où dominent les sulfures ; puis les *negrillos* qui sont des sulfo-arséniures et sulfo-antimoniures complexes (d'Ag, de Fe, de Ni, de Co, de Cu, de Pb, de Bi, de Hg...).

Le gisement de **Chañarcillo** (fig. 159) est constitué par un filon qui a recoupé des couches successives de calcaires et de diabases. Au-dessous des premières roches éruptives, dans les calcaires, on a trouvé des minerais extrêmement riches. Au passage des roches éruptives, il n'y a plus trace d'argent. Le passage d'une nouvelle bande calcaire a fourni encore de fortes teneurs en argent. A partir de 150 mètres, il n'y a plus d'argent natif, ni de chlorures, mais des sulfures et, finalement, l'argent disparaît totalement. En général, le contact entre les roches éruptives et le calcaire est marqué par le développement de masses silicatées (grenats) comme dans le type Banat.

Au **Japon** existent aussi de semblables types quartzeux cupro-argentifères.

III. — FILONS COBALTO-ARGENTIFÈRES

Cette association, représentée dans un certain nombre de mines, a pris récemment un grand développement industriel. La gangue peut être quartzeuse avec calcite accessoire ou uniquement calcaire. A peu près partout, on trouve du cuivre ; fréquemment du bismuth, parfois de l'uranium.

En **Saxe,** dans l'Erzgebirge, non loin de Freiberg, ce type cobalto-argentifère est bien développé, par exemple à *Annaberg*, à *Joachimstal* (où l'argent s'associe en outre à l'uranium dans une gangue de calcite et où les altérations ont joué un rôle considérable en concentrant les trois métaux : Ag, Co, Ur, dans les parties altérées) et à *Schneeberg*.

A **Annaberg** (fig. 160), exploité dès le xv^e^ siècle, le champ de fractures est tout à fait caractéristique et forme un réseau en toile d'araignée, comprenant à la fois des B. P. G. (le réseau le plus ancien de direction N. 75° E.) et des filons cobalto-argentifères dont la direction est dans l'ensemble N.-S. avec une tendance à la torsion.

En outre, on y connaît quelques filons stannifères. En tout plus de 300 filons.

Les filons cobalto-argentifères recoupent les filons stannifères et plombo-cuprifères, ainsi que des syénites, des diorites, des microgranites ; ils sont par contre recoupés par des filons de basalte ; on peut leur attribuer un âge tertiaire. Rarement, on y est descendu à plus de 150 mètres de profondeur : ce qui semble indiquer la relation entre les enrichissements

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

en argent et les altérations superficielles. La minéralisation consiste en quartz, fluorine, pyrite, minerais de nickel, de bismuth (bismuthine), de cobalt (smaltine), d'urane, un peu de galène, blende, auxquels est venue s'ajouter une venue ultérieure argentifère qui, par altération, a donné de l'argent natif, de l'argyrose et de l'argent rouge.

En outre, il faut mentionner l'importance des *Schwebende* : ce sont des zones de fractures, avec produits de broyage, interstratifiées dans les gneiss et les micaschistes, pyritisées, renfermant des matières charbonneuses et tout à fait comparables aux fahlbandes de Kongsberg. Les

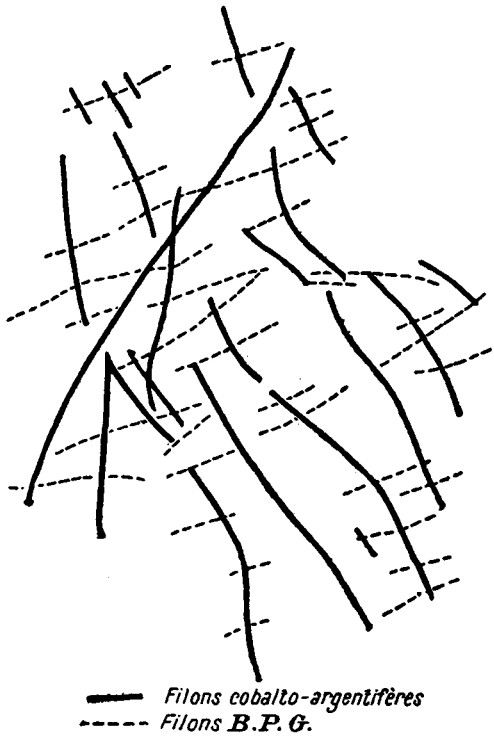


Fig. 160. — Plan des filons d'Annaberg.

matières charbonneuses ont dû jouer un rôle réducteur et, au croisement de ces zones, comme d'ailleurs des filons de basalte, les filons argentifères sont notablement enrichis.

A **Schneeberg**, les gisements sont identiques. Outre le quartz, la gangue comprend des carbonates (calcite, sidérose, dialogite), de la barytine, provenant de réactions et d'altérations secondaires. Les filons sont exploités uniquement dans les schistes cambriens où ils se ramifient volontiers et deviennent tout à fait inexploitables dans le granite où ils pénètrent vers 460 mètres de profondeur. On y a autrefois exploité des bonanzas comparables à celles du Nouveau-Monde (masse d'argent noir, d'argyrose et d'argent natif de 4 × 2 mètres).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

En **France,** la mine des **Chalanches** (*Isère*) est un type de cette sorte de filons. On y a exploité des minerais de cobalt et nickel arsenicaux, des terres ocreuses argentifères, tous produits de remaniement ; en profondeur, on a trouvé des minerais sulfurés avec carbonate de manganèse. Ces filons sont récents ; ils traversent le Jurassique et sont probablement d'âge tertiaire.

A **Sainte-Marie-aux-Mines** et à **Giromagny,** des gisements analogues ont été exploités activement du x^e^ au xvii^e^ siècle (vers 1510, ils occupaient 1.500 ouvriers). Depuis, repris maintes fois, ils n'ont plus donné de résultats ; on y a trouvé de l'argent natif, de l'argent rouge, associés à du cobalt, à du bismuth, avec gangue de quartz et parfois de calcite. On y rencontre de gros blocs d'arsenic natif accompagné de réalgar.

En **Espagne,** la mine de **Guadalcanal** a eu une grande prospérité vers 1550. On y trouvait des pyrites cobaltifères, imprégnées d'argent sulfuré et d'argent rouge, surtout concentrés au croisement de certains filons. La gangue était barytique. Abandonnée au moment de la découverte du Nouveau-Monde, elle n'a pu être reprise avec succès jusqu'ici.

Enfin au **Canada** (Ontario), le **district de Cobalt** a actuellement un développement énorme. En traçant la ligne de chemin de fer, les ouvriers ont trouvé des filons de smaltine avec argent natif. On en a tiré des minerais valant 4 et 5.000 francs la tonne. Les découvertes s'y sont multipliées ; il y en a encore, probablement, à faire plus au Nord. Le gisement se trouve au milieu de conglomérats, de schistes et de gneiss huroniens dans lesquels s'intercalent des venues éruptives avec lesquelles la métallisation est en rapport. Il se présente sous la forme d'innombrables fractures très minces, verticales, sinueuses, sans continuité, constituant autant de veines métalliques brillantes. Ces veines rappellent, par leur minceur (2 à 5 centimètres dans les parties hautes) celles de Kongsberg. Le remplissage consiste en smaltine (arséniure de Co) et nickéline (arséniure de Ni), altérées superficiellement en érythrine et annabergite ; en cobaltine et millérite ; en argent natif, avec gangue de calcite et très rarement de quartz ; en bismuth natif. L'argent natif a tendance à pénétrer dans la roche encaissante. Les minerais s'appauvrissent et semblent disparaître en profondeur.

IV. — FILONS A GANGUE DE CALCITE

Dans beaucoup de cas, ils semblent dus à des remaniements.

Cependant, en **Norvège,** le filon de **Kongsberg** (fig. 161) paraît primitif. Les veines y sont extrêmement minces (jusqu'à 1 centimètre) et très nombreuses, craquelant un massif de granites, de gneiss, de gabbros et ne s'enrichissant qu'à l'intersection de zones pyriteuses. Cette région paraît avoir été plissée à l'époque calédonienne. Des phénomènes de laminage y ont formé des zones broyées, irrégulièrement pyritisées [pyrite, pyrrhotine, chalcopyrite], traversant tous les terrains et ayant des largeurs variables entre 60 et 300 mètres. Ces zones sont appelées *fahlbandes*. C'est à la traversée de ces fahlbandes que les veines de fractures sont argentifères : les filons ne sont donc argentifères que par co-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

lonnes, à peu près verticales, séparées par des espaces stériles. Pour la recherche de l'argent, on ne suit pas les veines, mais les fahlbandes. On

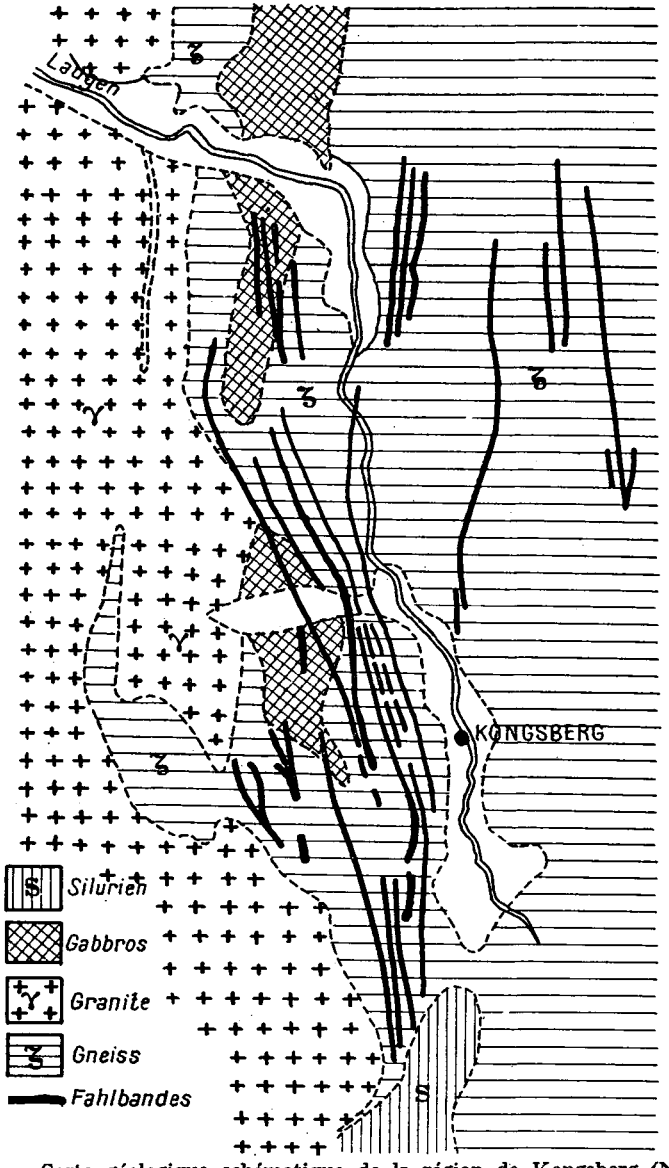


Fig. 161. — Carte géologique schématique de la région de Kongsberg (Norvège). (Les filons d'argent, trop minces, ne sont pas figurés).

y reconnaît au toucher les veines d'argent massif. Le minerai est constitué par des sulfures complexes avec argent natif, argent sulfuré, calcite.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Il faut ajouter la présence d'éléments hydrocarburés, qui paraissent avoir joué un rôle dans la précipitation de l'argent ; car seules les calcites bitumineuses sont argentifères. Les calcites stériles restent blanches et lamelleuses. L'argent natif et l'argent sulfuré sont les éléments principaux ; ils sont accompagnés de galène, blende, mispickel, fluorine.

Ces gisements continuent avec les mêmes caractères jusqu'à de grandes profondeurs (700 mètres) ; il faut donc invoquer, pour expliquer la présence de l'argent natif à une telle profondeur, d'autres phénomènes que les phénomènes d'altération habituels : peut-être, comme au Lac Supérieur, l'enfoncement en bloc d'un compartiment antérieurement altéré au voisinage de la superficie.

Après la pyritisation des falhbandes, l'argent serait arrivé à l'état carbonaté avec la calcite ; il aurait été réduit par les hydrocarbures, d'origine fumerollienne, et l'acide sulfhydrique, provenant des pyrites, et précipité en sulfure d'argent ; celui-ci aurait à son tour donné de l'argent natif, au contact des circulations chaudes : l'argent natif, ainsi obtenu, aurait été enveloppé par de la calcite secondaire. Cette hypothèse justifie la façon

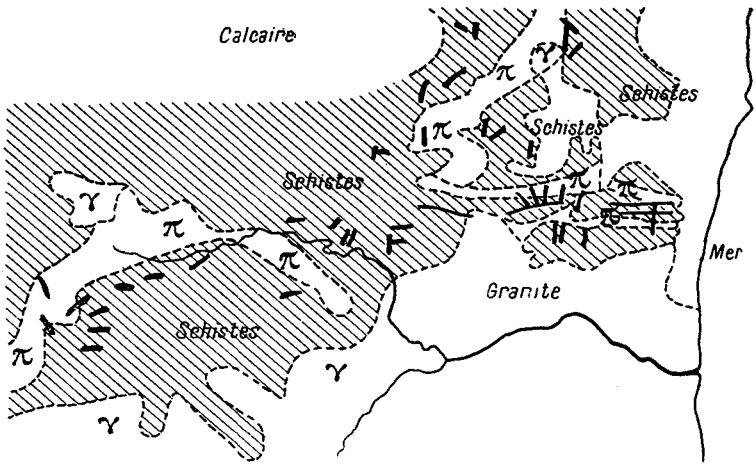


Fig. 162. — Carte géologique schématique de Sarrabus (Sardaigne).

dont l'argent natif semble avoir poussé sur le sulfure. Inversement l'argent natif a pu se retransformer localement en sulfure.

L'ordre de formation des minéraux est net :

1° Quartz (venue ancienne) ;

2° Sulfure d'argent et calcite ;

3° Fluorine, Barytine, Argent natif ;

4° Calcite (venue récente ou remaniement).

On trouve de plus une certaine quantité d'or.

On a pensé aussi que l'argent serait dû à la sécrétion latérale des pyrites. Cette théorie est actuellement à peu près abandonnée.

En **Sardaigne**, le gisement de **Sarrabus** (fig. 162) a eu, vers 1870-1890,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

une période de prospérité. Il y a, au milieu de schistes siluriens, un système de filons et des intercalations de quartzite qui arrêtent les eaux de circulation.

Les filons métallifères arrivent à la rencontre des porphyres et s'y perdent ; mais on les retrouve à leur sortie des porphyres.

Ils contiennent une forte proportion de fluorine avec calcite, barytine, galène et, dans la partie haute, sulfures d'argent et argent natif. On constate, ici encore, que l'argent natif résulte de la réduction du sulfure d'argent ; les filaments d'argent natif sont engagés dans la calcite, ce qui prouve que cette réduction s'est faite à une époque assez ancienne. On y a constaté l'influence réductrice des parcelles charbonneuses, contenues dans certains schistes.

En arrivant en profondeur, au-dessous du niveau hydrostatique, la minéralisation a changé brusquement ; les minerais d'argent ont disparu ; on a trouvé de la galène argentifère ; puis cette galène elle-même a disparu et la mine s'est épuisée.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXVII

MERCURE

1. Usages. — Pendant longtemps, le mercure a eu comme application principale l'*amalgamation* des minerais d'or. Mais, peu à peu, l'amalgamation cède la place à la cyanuration et à d'autres procédés.

Une autre application du mercure est la fabrication du *vermillon* dont l'emploi diminue devant les couleurs dérivées de la houille.

Les autres emplois du mercure sont assez restreints : la *dorure*, qui est de moins en moins employée, l'*étamage des glaces* à l'amalgame d'étain, presque abandonné, la fabrication des *baromètres*, *thermomètres*, *cuves à gaz*, la préparation du *calomel*, du *sublimé*, d'*onguents*, etc.

2. Statistique. — Fait très rare, la production du mercure a peu augmenté, malgré le cours élevé atteint par le métal : 6 à 7.000 francs-or la tonne. Cette faiblesse de la production tient au fait que le mercure est celui des grands métaux qui est arrivé le plus facilement vers la surface de l'écorce terrestre ; il s'épuise donc rapidement en profondeur et, d'autre part, les gisements cinabrifères sont peu nombreux dans le monde.

La production mondiale a été de 3.750 tonnes en 1890, 4.328 tonnes en 1897, 3.900 tonnes en 1909, 4.000 tonnes en 1913, 2.900 tonnes en 1920 ; elle est actuellement de 5.600 tonnes (1929).

Cette production se répartit ainsi entre les pays producteurs (en 1929) :

Espagne	2.467 tonnes (1.245 en 1913 ; 861 en 1920).
Italie	2.000 tonnes (1.000 en 1913).
Etats-Unis	817 tonnes (670 en 1913 ; 1.119 en 1918 ; 260 en 1926).
Mexique	82 tonnes (166 en 1913 ; 37 en 1924).
Chine	2 tonnes en 1926 (293 en 1918).
Tchécoslovaquie	65 tonnes (6 en 1922 ; 82 en 1926).
Divers	100 tonnes (dont 4 pour l'Autriche).

Le centre le plus important, qui a de beaucoup la supériorité, reste le

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

district d'**Almaden** (*Espagne*) ; il est exploité depuis les temps les plus reculés et a eu un véritable monopole aux XVI^e^ et XVII^e^ siècles :

1887	1.887	tonnes
1901	754	»
1913	1.245	»
1918	544	»
1922	1.314	»
1924	900	»
1927	2.500	»

Le centre d'**Idria**, découvert en 1490, a été exploité sans interruption, bien qu'on l'ait cru épuisé à une certaine époque. Sa production, de 1880 à 1910, a légèrement augmenté, à cause de l'adjonction de petites mines voisines (1880, 550 tonnes ; 1910, 637 tonnes.)

Le centre du **Monte-Amiata**, en *Toscane*, s'est beaucoup développé depuis un demi-siècle. Il y a là une série de petites mines peu importantes, mais nombreuses : 1880 : 109 tonnes ; 1884 : 260 tonnes ; 1910 : 893 tonnes.

Avec ces deux centres, l'Italie arrive actuellement presque au niveau de l'Espagne et même fut au premier rang dans la production du mercure de 1920 à 1926.

Les gisements de **Californie** ont été découverts vers 1840, au moment de la conquête du pays par les Etats-Unis. Mais leur développement ne date que de 1870 ; ils ont produit alors 3.000 tonnes en un an, faisant tomber les cours de moitié ; ils se sont épuisés progressivement. En 1918, leur production était encore assez forte (1.100 tonnes) ; en 1922, elle est descendue à 200 tonnes ; cependant, en 1928, elle est remontée brusquement à 600 tonnes.

Le reste de la production est fourni par le **Mexique**, la **Tchécoslovaquie**, la **Chine**, la **Russie**.

Au point de vue historique, on peut citer, comme autres gisements, la mine de **Huancavelica** au *Pérou*, qui a fourni le mercure nécessaire à l'amalgamation dans l'Amérique du Sud, et celle de **Kweitchéou**, au Sud de la *Chine*, qui a alimenté toutes les fabrications de vermillon de Chine ; mais les gisements, reconnus récemment par les Européens, paraissent épuisés.

En résumé, les points où l'on exploite le mercure sont très peu nombreux et Almaden a fourni depuis l'antiquité presque la moitié du mercure produit dans le monde.

3. Géologie. — Les gisements de mercure sont faciles à reconnaître à cause de la présence du cinabre rouge. Ils se trouvent *presque tous sur des dislocations d'âge tertiaire*. Almaden seul fait exception, au moins en apparence.

D'autre part, le mercure est localisé dans une série de *petites veines* ; il y forme des *enduits minces* dans des interstices de formes très variées. A Almaden, il s'agit d'un grès poreux dont tous les vides sont imprégnés de cinabre. Ailleurs ce sont des marnes et des schistes qui sont imprégnés. Les solutions mercurielles très stables n'ont pu se précipiter que dans des veines très étroites.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

En outre, la plupart des gisements sont liés à la présence d'*hydrocarbures* qui paraissent avoir joué le rôle de réducteurs et avoir facilité la précipitation du cinabre.

Enfin, le mercure paraît exister dans quelques sources thermales actuelles. On constate souvent sa *remise en mouvement* très facile à des époques contemporaines. En Toscane, des mines antiques ont montré d'anciens boisages et même un squelette couverts de cinabre.

En résumé, contrairement à d'autres métaux, *le mercure a dû venir très près de la surface de la croûte terrestre.* Il n'a été précipité que dans des fissures minces et à la faveur d'hydrocarbures.

Dans ses gisements, le mercure est généralement isolé et n'est accompagné que par des matières hydrocarburées et un peu de pyrite ; quelquefois il est associé à l'arsenic et à l'antimoine (réalgar, orpiment, stibine, cuivre gris). Le plus souvent, les gisements de cinabre se présentent au voisinage immédiat de roches éruptives (trachyte, andésite, serpentines...) avec lesquelles ils sont probablement en relation.

4. Principaux gisements. — Almaden (fig. 163). — Dans la zone plissée de la Meseta espagnole se trouvent des schistes siluriens avec quartzites intercalés et filons de roches éruptives. Un phénomène postérieur a amené du mercure qui a imprégné presque exclusivement les quartzites ainsi que, partiellement, une brèche feldspathique et serpentineuse, la frai-

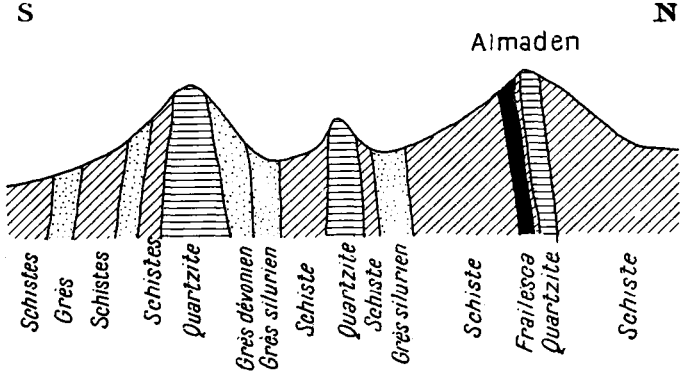


Fig. 163. — Coupe géologique de la région d'Almaden.

lesca. On a donc affaire à des *quartzites cinabrifères* imprégnés dans toute leur masse. Il en résulte une continuité exceptionnelle pour un gisement de mercure.

D'ailleurs certains bancs de quartzite ont résisté à l'imprégnation ; les 3 bancs imprégnés ont l'aspect de filons. On trouve aussi quelques grès cinabrifères et des schistes où le cinabre a pénétré localement.

Le cinabre est la seule substance métallique qui soit présente. La teneur est variable : on a trouvé jusqu'à 20 % de mercure ; la teneur normale des minerais riches est de 6 à 7 %. Des remaniements ont donné des stalactites de cinabre, des géodes avec cristallisations de quartz, barytine, etc.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Il y a, en **Espagne**, quelques autres gisements. A **Mieres** (*Oviedo*), le calcaire carbonifère est imprégné de réalgar, orpiment, cinabre.

En **France**, il y a eu une mine de mercure exploitée vers 1740, à **Ménildot** (Manche). On a fait des recherches plus récentes à la *Mure* (*Isère*). On a trouvé aussi un peu de mercure natif dans l'*Hérault* ; en *Corse*, le cinabre accompagne la stibine.

Dans le **Palatinat** et le **Pays de Deux-Ponts**, quelques mines ont été exploitées autrefois : des fractures, au milieu de schistes et de grès carbonifères, sont remplies d'une argile avec fines inclusions de cinabre en veinules.

Gisement d'Idria (*Carniole*) (fig. 164). — Il est nettement d'âge tertiaire. Il se trouve dans une formation triasique plissée, recouverte par du Carbonifère charrié. Le mercure imprègne certaines couches chargées d'hydrocarbures et se trouve aussi en fissures étroites. Il en résulte un

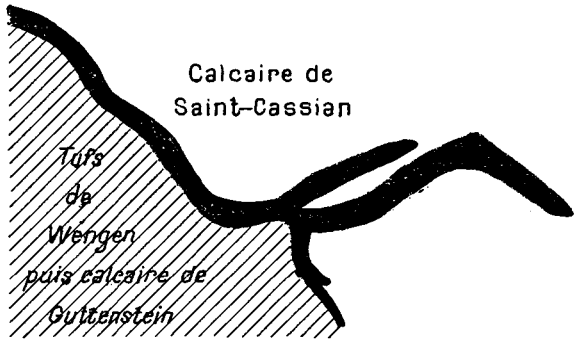


Fig. 164. — Coupe du gîte d'Idria (Carniole).

gisement très complexe avec une série d'imprégnations. Il y a là, comme minerais, des types très variables : schistes bitumineux cinabrifères, dolomies ou calcaires avec innombrables fissures imprégnées de cinabre, schistes carbonifères imprégnés de mercure natif.

Des phénomènes de remises en mouvement ont donné des minerais particulièrement riches : le Stahlerz à 75 % de Hg, le minerai de brique où Ziegelerz, des concrétions phosphatées (Korallenerz) où s'est concentré le cinabre (2 à 3 %) et où l'on trouve un peu de bitume.

Dans la même région, il existe une série de petites mines : **Vallalta** (*Vénétie*), **Santa-Anna** (*Carniole*) dans un calcaire triasique fissuré avec cinabre et bitume, **Littai** (*Carniole*,) où l'on trouve de la galène et du cinabre, avec un grand développement de cérusite, résultant de l'altération de la galène. Ce gisement se présentait sous forme d'un filon-couche dans des grauwackes carbonifères.

Tous ces gisements sont en relation avec des fractures ayant intéressé le Crétacé et même la base du Tertiaire ; ils sont donc nettement d'âge ertiaire.

D'autres gisements existent en *Serbie*, en *Bosnie*, en *Russie* (**Nikitovka**).

Gîtes de Toscane. — Le **Monte-Amiata** est un massif volcanique (tra-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

chytique) d'âge tertiaire, enveloppé par une série de terrains éocènes, très fracturés ; des horsts de Lias, Trias, terrains anciens, surgissent au milieu de l'Eocène. Sur tout le pourtour du volcan, on trouve des associations de stibine et de cinabre, qui ont pris des aspects variables suivant la nature des terrains rencontrés. Les phtanites de **Cornacchino** sont des bancs extrêmement minces de matières siliceuses, blanches, avec petites veines de cinabre rouge, facile à trier.

A **Siele** (*Toscane*), on a trouvé des marnes imprégnées de cinabre formant une série de veines. En profondeur, on a rencontré une grande couche (diga), avec argile cinabrifère et agglomérations de mercure. Ce cinabre est associé avec de la calcite et un peu de pyrite.

A **Abbadia-San-Salvatore** (*Toscane*) (fig. 165), le gisement principal se trouve au contact par faille entre l'Eocène et le trachyte. Ce contact est

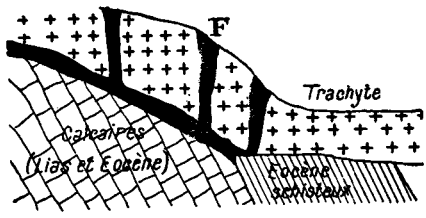


Fig. 165. — Coupe théorique à Abbadia-San Salvatore.

jalonné par une couche d'argile grise qui paraît venir de la décomposition des calcaires éocènes et qui contient des veines de cinabre. En outre, les failles du trachyte sont remplies de brèches argileuses souvent minéralisées. Enfin, par remaniement superficiel, le cinabre a formé des veines rouges dans un dépôt siliceux à Diatomées qui provient d'un petit bassin lacustre.

Gisements de Californie. — Il y a toute une zone mercurielle au N. et au S. de San Francisco, intercalée entre la zone des mines d'or et l'Océan. Elle s'étend sur 250 kilomètres depuis Sulphur Bank jusqu'à New-Idria.

Les terrains d'âges divers (jusqu'au Crétacé supérieur) ont subi un métamorphisme intense. Il s'y trouve des imprégnations mercurielles, qui semblent post-miocènes et peut-être même en partie actuelles et qui sont en relation avec d'importantes venues volcaniques et avec des sources chaudes.

Vers 1850, on a trouvé à **Sulphur Bank** une croûte de soufre natif à la partie superficielle de coulées de basalte ; on l'a percée ; des sources chaudes se sont fait jour, découvrant du cinabre rouge. Le cinabre est en association avec le soufre, la pyrite, les matières bitumineuses, la silice et la calcite. Vers le N.-E., les sources de Steamboat-springs sont cinabrifères.

Plus au Sud, les imprégnations cinabrifères se trouvent, tantôt dans des calcaires néocomiens, tantôt dans des serpentines (**New-Almaden**) ; elles forment un véritable stockwerk, pincé entre deux filons-failles. Toutes les

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

fissures sont imprégnées de cinabre avec matière bitumineuse, pyrite et chalcopyrite ; en certains points, on a trouvé de grandes chambres ayant par exemple 90 × 20 × 9 mètres avec des minerais à 10 % et parfois 25 %.

A **Great-Western**, le cinabre se trouve au contact d'une serpentine et d'un grès.

A **New-Idria**, le mercure imprègne le Néocomien ; il est associé avec du quartz, des matières bitumineuses, de la pyrite ; il forme également des stockwerks.

Gîtes divers. — Le gîte de **Huancavelica** (*Pérou*), exploité aux XVI^e^ et XVII^e^ siècles, est très analogue à ceux de Californie : stockwerks disloquant des couches crétacées avec poches dans le calcaire et imprégnations dans les grès ; il y a une association avec du réalgar et du mispickel. Les gîtes du **Kwei-Tchéou** (*Chine*) appartiennent à une zone mercurielle très étendue. Les mines de réalgar y sont nombreuses. En Chine, comme en Toscane, on trouve successivement : 1° auréole avec minerais d'étain et mispickel ; 2° auréole des mines cuivreuses ; 3° auréole où l'on trouve des quantités croissantes de plomb et zinc ; 4° apparition de roches microlithiques et de gisements mercuriels.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXVIII

OR

1. Aperçu historique. — L'or, malgré sa rareté, a été très probablement le premier métal découvert. Son éclat, sa couleur, sa présence dans les sables de nombreuses rivières suffisaient à attirer l'attention ; mais à l'origine, il devait être relativement peu estimé par rapport aux métaux susceptibles de former des outils (cuivre, puis fer) et, pendant très longtemps, il servit seulement comme bijou et ornement. C'est plus tard qu'il a été utilisé comme monnaie et qu'il a pris de ce fait toute son importance.

L'or est toujours venu des extrêmes confins des pays civilisés : pour les Egyptiens, du Haut Nil ou de la mer Rouge ; pour les Mycéniens ou les Asiatiques, de la Phrygie (légendes de Crésus et de Midas) ; pour la Grèce classique, de la Macédoine (Mont Pangée) ; puis du Nord de l'Italie ; puis de la Gaule et de l'Espagne, etc.

Pendant le Moyen Age, toutes ces mines étaient épuisées ; l'Europe a vécu sur elle-même et sur les stocks anciens d'or, accumulés depuis l'antiquité.

Au moment de la découverte de l'Amérique, les « conquistadores » ont été à la recherche de l'or au Mexique, en Colombie, au Chili, au Pérou ; ils ont d'ailleurs surtout trouvé de l'argent.

Jusqu'au XVIII^e siècle, l'or est principalement venu d'Amérique. L'Afrique exporta également des quantités considérables d'or (probablement plusieurs milliards, venant de la Gold Coast, du Mozambique, de Madagascar).

Puis les quantités d'or importées ont diminué progressivement et il y eut une véritable disette d'or pendant la première moitié du XIX^e siècle, due en partie à l'arrêt des exploitations minières en Amérique du Sud par l'insurrection des colonies espagnoles et aux habitudes de thésaurisation de l'or en Extrême-Orient. En effet, si l'or se perd peu, si le frai des monnaies en use de faibles parties, l'Inde et les pays limitrophes absorbent de grandes quantités d'or sous forme de bijoux, etc. ; on commence à s'en rendre compte par les statistiques qui fournissent seulement des minima, une partie des transports de métaux précieux leur échappant. Cet or, enfoui dans les trésors de l'Extrême-Orient, peut reparaître dans les années de disette. En 1932, on a vu l'Angleterre, après la faillite de la livre sterling, puiser dans les réserves de bijoux de l'Inde.

A partir de 1848, un nouvel afflux d'or arriva en Europe, amenant

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

la baisse de la monnaie et l'augmentation du coût de la vie. C'est entre 1848 et 1850 qu'on a découvert les gisements d'or alluvionnaire de la Californie et de l'Australie ; la production a monté rapidement : 1849, 135 millions ; 1853, 800 millions. Mais l'or alluvionnaire exploité dans ces pays s'est épuisé très vite et la production de l'or dans le monde a diminué à nouveau jusqu'en 1880 (500 millions).

A partir de 1880, s'est produite la transformation actuelle. Elle est due à plusieurs causes : d'abord au grand mouvement d'expansion coloniale qui a amené la découverte de gisements très riches : découverte du Transvaal (1885-1894), de la Rhodésia ; découverte de la Gold Coast dans le Golfe de Guinée ; découverte des gîtes de l'Australie occidentale (Coolgardie) ; reprise des mines de l'Inde vers 1885, en particulier à Mysore ; en Amérique du Nord, découverte des gîtes des frontières mexicaines et canadiennes, et de ceux de l'Alaska ; en Amérique du Sud, exploitation des mines du Brésil, de Colombie, de Bolivie. Un second fait est intervenu qui n'a pas encore produit tout son effet : c'est la découverte du procédé de la cyanuration. Seul ce procédé a permis l'exploitation des gisements du Transvaal et la renaissance des mines d'or en France et dans le reste de l'Europe.

Par suite de ces deux causes, la production de l'or a crû tous les ans jusqu'à la guerre. En 1848, il pouvait y avoir pour 14 milliards d'or dans le monde ; de 1848 à 1890, on en a sorti des mines 21 milliards ; de 1891 à 1910, plus de 30 milliards. Dans les années qui ont précédé la guerre, on en a extrait 2 milliards et demi par an. Actuellement la production est d'environ 1.800 millions de francs-or. Cependant, il y a des indices marqués de fléchissement de la production dans les pays anciennement exploités (Etats-Unis, Australie) ; l'Alaska est épuisé en tant que placer ; en Sibérie Occidentale et dans l'Oural, on a également une diminution de la production ; même au Transvaal, qui a déjà produit plus de 30 milliards de francs-or, toutes les anciennes mines fléchissent. D'ici un certain temps, les grands champs d'or auront donc baissé dans une large proportion. Il est vrai que, momentanément, la mise en œuvre de nouveaux champs aurifères contrebalancera la baisse des anciens. Ainsi le *Canada* se développe par tranches successives à partir du Sud : il devient le second pays producteur d'or dans le monde . Si la *Chine* sort un jour de l'anarchie, on y reprendra peut-être des champs d'or, très anciennement connus. De même dans l'*Asie Centrale*. L'*Amérique du Sud* et le *Mexique* interviendront également : le Mexique produit 20.000 kilogrammes d'or, exploités par des mines organisées à l'américaine et se classe déjà au 5e rang. Les gîtes de la *Colombie*, du *Pérou*, etc., pourront prendre un grand développement.

En résumé, les courbes de production semblent devoir rester sensiblement horizontales pendant quinze ou vingt ans ; puis, il est probable qu'elles baisseront franchement, à moins que l'augmentation de la valeur de l'or ne soit suffisante pour permettre la mise en valeur des réserves de minerais pauvres.

Au point de vue économique et social, il faut, d'ailleurs, considérer que les effets produits par les variations de la valeur de la monnaie sont toujours momentanés et correspondent à un simple décalage jusqu'à ce que tous les prix (salaires et coût de la vie) aient eu le temps de s'adapter à leur nouvel étalon de mesure.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

2. Usages. — La consommation de métaux précieux pour les emplois industriels (*orfèvrerie, bijouterie,* etc.) est plus considérable que pour la *monnaie.* Mais il est difficile d'évaluer exactement la part qui revient à chacun de ces usages. En effet, une forte proportion d'or est empruntée aux monnaies et aux anciens bijoux qui sont refondus et échappe ainsi à toute statistique. Cependant, il est probable que les usages industriels absorbent jusqu'à 35 et 40 %, quelquefois même 70 % de la consommation actuelle [Ces différences tiennent à des divergences d'appréciation sur les statistiques et aussi aux variations de la consommation ; la consommation diminue, les années de crise, d'une façon formidable]. En outre, une quantité d'or notable (20 à 30 %) va se perdre dans les *pays d'Orient.*

La fabrication des *monnaies* est très variable suivant les années. On a frappé beaucoup de monnaies d'or dans les années d'avant-guerre, à cause du développement du commerce et surtout à cause de l'adoption de la monnaie d'or par les pays neufs. Actuellement on se borne à accumuler l'or en lingots dans les Banques et à faire circuler les billets auxquels il sert de gage.

En temps normal, on peut se rendre compte que la disparition de la monnaie d'or est importante et rapide. Pour cela, dans un pays donné et à un jour donné, on compte les pièces d'or en circulation et on prend le nombre de pièces de diverses émissions ; on constate la proportion dans laquelle les pièces de ces diverses émissions circulent ce jour-là. La frappe de l'or de 1885, par exemple, avait presque entièrement disparu en 1914 ; elle avait été draînée par la fabrication de bijoux, par les pays étrangers, etc. Puis, en supposant que la dernière frappe soit restée intégralement en circulation, on peut établir, pour chacune des frappes antérieures, le *coefficient de survie,* c'est-à-dire le nombre relatif des pièces restant en circulation. On se rend compte par ce procédé des besoins d'or annuels.

Le développement des établissements de crédit et l'adoption des chèques pour les paiements diminueront certainement les besoins d'or dans l'avenir. Mais il serait imprudent de compter uniquement sur le papier pour remplacer le métal, comme l'ont suffisamment montré depuis 1929 les débâcles des pays tels que l'Allemagne, les Etats-Unis et l'Angleterre où l'on avait abusé systématiquement du crédit.

3. Statistique. — En 1929, on a produit dans le monde 607.000 kilogrammes d'or fin, valant 1.760 millions de francs-or. Voici, par comparaison, quelques chiffres montrant que la production actuelle est nettement inférieure à celle d'avant-guerre :

1909	689.000 kg.	
1912	714.000 »	
1913	692.000 »	(env. 2 milliards francs-or)
1915	707.000 »	
1922	480.000 »	
1924	595.000 »	
1928	611.000 »	(env. 1.770 millions de francs-or)

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Sur ce total, la production se répartit ainsi entre les principaux pays producteurs (1929) :

	1930	1929	Divers
	en kg.	en kg.	
Transvaal et Rhodésia	350.000	341.000	309.000 en 1913.
Canada	65.000	60.000	25.000 en 1913; 80.000 en 1932.
Etats-Unis (y compris les *Philippines, l'Alaska, Porto-Rico*).	71.000	68.000	134.000 en 1913 ; 152.000 en 1915.
Russie et Sibérie....	31.000	31.000	50.000 en 1913 ; 4.000 en 1920 ; 32.000 en 1932.
Mexique	21.000	20.500	26.000 en 1913 ; 7.000 en 1915 ; 24.000 en 1926.
Australasie	20.000	18.000	79.000 en 1913 ; 47.000 en 1920.
Japon et Corée	16.000	14.800	11.000 en 1913.
Inde anglaise.....	10.000	11.000	17.000 en 1913, en 1915 et en 1916.
Ouest Africain	8.000	6.600	7.600 en 1924.

En outre, la production actuelle oscille autour de 4.000 kilogrammes en *Chine* (5.000 kilogrammes en 1927, 3.000 kilogrammes en 1930) et au *Congo belge* ; autour de 3.000 kilogrammes, dans les *Indes néerlandaises* (5.100 en 1913), au *Pérou*, au *Brésil* (5.370 en 1913) ; autour de 2.000 kilogrammes, au *Chili*, en *Amérique Centrale* (5.400 en 1919), en *Colombie* (9.000 en 1918), à l'*Equateur* et en *Roumanie*.

La *France* et ses colonies ont une petite production d'environ 3.690 kilogrammes en 1929 (8.206 kilogrammes en 1913).

France continentale	1.795 (2.386 en 1913).
Guyane française	1.522 (3.760 en 1913).
Madagascar	187 (2.060 en 1913 ; 450 en 1923).
A. O. F.	Environ 180.

Dans les dernières années, de tous les pays gros producteurs d'or, seul le *Transvaal* proprement dit a maintenu sa production, qui était estimée en 1910 à 810 millions de francs-or et qui, en 1929, dépasse 1 milliard de francs-or ; seul le *Canada* a considérablement augmenté sa production (53 millions francs-or en 1910 ; 200 millions en 1929 et 1931). Tous les autres pays ont diminué : *Etats-Unis* (500 millions francs-or en 1910 ; 220 en 1929), *Russie* (185 millions francs-or en 1910 ; 120 en 1929), *Mexique* (124 millions francs-or en 1910, 70 en 1929).

Sur le total de la production mondiale, ce sont les pays anglo-saxons qui produisent la plus grande partie de l'or soit :

506.000 kilogrammes d'or valant environ 1.700 millions francs-or en 1929, dont 1.450 millions pour l'Empire britannique et 250 millions pour les Etats-Unis.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

4. Répartition des gisements d'or dans le monde. — Europe. — Il existe un certain nombre de gisements d'Or en *Transylvanie* (Zalathna, Nagyag) et en *Tchécoslovaquie* (Schemnitz). A titre historique on peut citer aussi les gisements des *Alpes* (Mont Rose et Simplon, région des Tauern ; mines fermées actuellement), les alluvions du *Piémont*, les laveries d'or du *Rhin* (il y avait encore 1.500 orpailleurs, il y a un demi-siècle), les poudingues aurifères sur lesquels est bâtie la ville de *Grenade*, les mines du *Mont Pangée* en *Macédoine* actuellement épuisées. En *France*, nous assistons depuis peu à une petite renaissance aurifère (la *Lucette*, la *Bellière*, le *Châtelet*).

Asie. — Le groupe de l'*Oural*, très ancien, est à peu près complètement épuisé. Le district de l'*Iénisséi*, très important il y a 15 ans, a beaucoup diminué. Le groupe de la *Léna*, au contraire, a pris un grand développement dans les années d'avant-guerre ; de même celui de la *Transbaïkalie*. On assiste donc en Sibérie à un déplacement des exploitations aurifères de l'Ouest vers l'Est. La *Mandchourie* et la *Corée* (bassin de l'Amour) sont très riches en or. Au *Japon* (île de Sado), il y a des exploitations très anciennes. Dans le *Haut-Thibet*, on trouve quelques laveries d'or. Dans l'Inde, le *Mysore* a pris un certain développement.

Amérique du Nord. — Les *Etats-Unis*, l'*Alaska*, le *Canada* jouent un rôle considérable. Aux Etats-Unis, la production de l'or s'est déplacée vers les pays neufs, c'est-à-dire de l'Est vers l'Ouest et du Sud au Nord ; les principaux centres producteurs aux Etats-Unis sont : la Californie, le Dakota du Sud (Homestake), le Colorado, l'Utah, le Névada et l'Arizona. Le Canada (Colombie britannique, Ontario) tend à prendre une place capitale. Le prolongement de la zone californienne au *Mexique* est devenu très important.

Amérique du Sud. — Les premières découvertes ont été faites dans l'*isthme de Panama*, puis dans le *Vénézuela* et les *Guyanes*. Les mines les plus riches se trouvent en *Bolivie*, déjà mises en œuvre par les indigènes. Au Brésil, il y a eu un grand développement des mines d'*Ouro-Preto*.

Afrique. — Sur la côte de la Mer Rouge, se trouvaient les mines d'or de l'ancienne *Egypte*. Le groupe de l'*Abyssinie* a exporté autrefois de fortes quantités d'or. Les massifs du *Fouta-Djalon* et du pays de *Kong* ont, dans les derniers temps surtout, donné des espérances, généralement déçues. Le *pays des Achantis* et la *Gold Coast* ont fourni de meilleurs résultats malgré des déboires. Le *Witwatersrand* fournit la moitié de la production mondiale avec tendance à reporter les exploitations vers l'Ouest. La *Rhodésia* a été un district important. Le *Congo belge* commence à entrer en ligne à Kilo-Moto. *Madagascar* fournit une petite quantité d'or.

Australasie. — C'est dans le *New-South-Wales* et l'état de *Victoria* que se trouvent les plus anciennes mines (800, 900, même 1.500 mètres de profondeur) qui s'épuisent l'une après l'autre. Le *Queensland* n'a jamais donné de résultats comparables. Vers 1891, on a mis en valeur les mines de la côte Ouest de l'île du Sud de la *Nouvelle-Zélande* ; mais le résultat a été médiocre. Dans l'Ile du Nord, autour de la baie d'Hauraki, on a trouvé également quelques gisements.

Enfin toute l'*Australie occidentale* (Coolgardie, Kalgoorlie) a donné pendant plusieurs années des résultats merveilleux ; sa production tend à baisser rapidement.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

5. Minerais et associations. — En raison même de sa valeur (3.444 francs-or le kilogramme), l'or est exploité dans des conditions spéciales. Avec des minerais contenant 8 à 10 grammes d'or par tonne dans une roche, 3 francs réduits par mètre cube dans les alluvions, l'exploitation est possible au point de vue industriel.

Aussi les minerais d'or proprement dits jouent-ils un rôle insignifiant : 80 % de la production d'or vient de minerais où l'or est absolument invisible.

L'*or natif* vient de pyrites aurifères dont la pyrite a été éliminée. On trouve quelquefois des minerais très riches avec de véritables efflorescences d'or. Ces minerais donnent l'illusion d'une extrême richesse ; ils disparaissent d'ordinaire rapidement en profondeur. Cette forme de minerais est destinée à s'épuiser complètement.

Parfois l'or est associé à l'argent sous la forme d'*électrum*, renfermant 1 /4 argent et 3 /4 or et qu'on a exploité en Lydie au temps de Crésus.

Les *tellurures d'or* complexes, calavérites, sylvanites, avec argent, plomb, antimoine, persistent en profondeur. Considérés autrefois comme des curiosités, ils ont constitué les très importants districts de Cripple-Creek, de l'Australie occidentale et de l'Ontario.

On connaît également des *minerais séléniés* extrêmement difficiles à traiter (Iles Célèbes).

L'association de l'or avec le soufre est très fréquente (*pyrites aurifères*). L'or, à l'état natif en surface, existe en profondeur en association intime avec la pyrite, association sur la nature de laquelle on n'est pas fixé. Ces pyrites aurifères constituent aujourd'hui la forme la plus habituelle et la plus pratique de minerais d'or. Il existe de même des *pyrrhotines* et des *chalcopyrites aurifères*.

L'association avec l'*arsenic* (*mispickel aurifère*) est fréquente. Ces minerais, longtemps négligés parce qu'il était absolument impossible de les traiter, constituent aujourd'hui une grande ressource.

L'association avec l'*antimoine* est également fréquente (*stibine aurifère*) ; elle a été négligée jusqu'à ces dernières années.

Les autres métaux du même groupe, *bismuth*, *molybdène*, ont également des affinités avec l'or. On connaît même l'or associé avec des minerais d'*Étain*.

La gangue accompagnant les minerais aurifères est presque toujours le *quartz* ; l'or a dû cristalliser à température relativement haute dans l'auréole des magmas ignés, avec intervention probable de fumerolles chlorofluorurées. Les quartz aurifères ont des aspects très variés et très caractéristiques : 1) quartz carié, criblé de cavités bulleuses, avec tons rubéfiés ; 2) quartz terne, bleuté, avec fines traînées pyriteuses (type du Callao) ; 3) quartz très luisant et résineux avec colorations blanches et noirâtres.

6. Géologie des gisements d'or. — L'or est surtout *en relation avec des roches éruptives acides* ; aussi ne rencontre-t-on guère de ségrégations où le métal s'est concentré, ce type paraissant spécial aux roches basiques. Seuls, quelques gabbros, norites, etc... contiennent des pyrites aurifères.

Au contraire, à la périphérie des roches acides, il existe des cristallisations

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

pouvant contenir de l'or. Ainsi on a exploité, dans des gisements du type Banat, des chalcopyrites aurifères.

Relations de l'or avec différents types de roches.

a) *Avec les roches acides grenues du groupe du granite* : l'or est englobé dans les granulites, pegmatites, quartz, qui dérivent les uns des autres. On peut citer l'association intime, à Berezowsk, de l'or et du quartz pyriteux. Dans les granulites de Sibérie, le même fait s'observe.

On peut rattacher à ce mode de formation le cas où l'or se trouve dans les gneiss : il y a eu introduction d'or dans les auréoles de métamorphisme autour d'un massif granitique (Guyane, Madagascar).

b) *Avec les roches microgrenues* : l'or est également associé à la série des roches du type diabase ou microgranite, notamment dans l'Ontario. Parfois ces filons d'or dérivant des roches porphyriques contiennent des stibines.

c) *Avec les roches microlithiques* : l'or est très fréquemment associé à des roches plus superficielles encore de structure microlithique. Ainsi les trachytes, rhyolithes, andésites, dacites, etc... peuvent en contenir (Japon, Ouest-Américain, etc.).

De cette diversité de nature de gisements, résulte l'association de l'or avec des métaux très différents. Dans les gisements granitiques, on le rencontre avec l'étain, avec l'arsenic et avec le cuivre ; dans le groupe microgrenu, on a des types de stibines aurifères et des types plombo-auro-argentifères. Enfin, l'or peut se trouver avec le mercure dans les roches volcaniques de formation plus récente, comme les roches éruptives crétacées et tertiaires de l'Ouest américain. Cette diversité de gisements qui lui semble particulière peut tenir en grande partie à ce qu'on l'a recherché partout avec un soin tout spécial.

L'or peut donc se présenter dans les phases diverses d'une même formation géologique. On a pensé autrefois (Murchison) qu'il était toujours d'âge primaire ; depuis on l'a trouvé dans de nombreux filons d'âge tertiaire. Actuellement on croit (pour lui comme pour les autres métaux) que, dans chacune des phases de plissement, l'or a pu monter dans la croûte superficielle où on le retrouve par suite, en raison des érosions plus ou moins avancées, à des hauteurs diverses.

7. Principaux types de gisements.

I. — INCLUSIONS AURIFÈRES DANS DES ROCHES SURTOUT ACIDES

Les quantités d'or contenues à l'état d'inclusions dans ce genre de roches sont trop faibles pour donner lieu à des exploitations ; mais, par altération, elles sont l'origine première de placers et d'alluvions aurifères.

II. — GISEMENTS D'IMPRÉGNATIONS DIFFUSES

Il existe de nombreuses régions où les gneiss, micaschistes, schistes métamorphiques, sont imprégnés de pyrite aurifère, par suite de venues métallisantes contemporaines de la feldspathisation. C'est particulièrement

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

le cas des *anciennes plates formes primitives:* régions de plissements extrêmement anciens et arasés, qui, depuis très longtemps, n'ont plus subi d'autres plissements et qui sont parfois recouvertes en discordance par des couches sensiblement horizontales du Carbonifère, du Dévonien, du Silurien, etc. Le soubassement de roches anciennes (grânite) est généralement mis à jour par les phénomènes d'érosion. Les couches horizontales superficielles sont dépourvues de formations métallifères; mais le soubassement ancien contient souvent sur de grandes étendues des imprégnations de pyrite qui forment une multitude de lentilles discontinues, de veines plus ou moins chargées de quartz, au milieu des terrains métamorphiques. Ces veines pyriteuses s'interstratifient en principe, mais présentent néanmoins de fréquentes ramifications transversales. On ne trouve aucun point où il y ait des concentrations importantes; il y a, dans la roche ancienne, des teneurs de quelques grammes, parfois de quelques centigrammes d'or à la tonne. Aussi ce genre de gisements a-t-il, en général, individuellement, une faible valeur qui empêche souvent l'exploitation directe. Toutefois, depuis l'époque cambrienne, ces pays ont souvent subi d'importantes altérations continentales qui ont pu concentrer l'or à la surface et produire des points d'enrichissement chimique. En outre, ils paraissent être la source première d'une grande partie de l'or alluvionnaire et, par concentrations mécaniques et remises en mouvement successives, ils ont donné naissance à des placers fort riches et très étendus.

Tel est le cas de la Sibérie, de l'Inde, du Canada, de l'Afrique centrale, d'une partie de l'Afrique australe, de Madagascar, de la Guyane, du Brésil, où, en certains points, on a pu trouver des concentrations telles qu'on a pu les exploiter.

En **Sibérie**, les explorations se sont produites de l'Ouest vers l'Est ; on a atteint l'Oural, puis l'Obi, puis l'Iénissei, enfin la Léna.

Dans la région de l'**Iénisséi**, on trouve des schistes argileux, des quartzites, ayant l'aspect de Précambrien, recouverts en discordance par du Silurien fossilifère. Dans ces terrains, il y a des veinules quartzeuses, soit transversales, soit intercalées sous forme de filons-couches dans les schistes. Elles contiennent de la pyrite aurifère, du mispickel aurifère ou de l'hématite aurifère provenant de l'altération des pyrites.

Dans les points les plus riches, on a remarqué une association de l'or avec les tourmalines ; la teneur en or des gneiss est insignifiante ; cependant aucune analyse ne se fait sans donner des traces d'or.

Dans la région de la **Léna**, l'or est également associé à la pyrite. Un traitement mécanique des gneiss permettant d'isoler les pyrites, on a trouvé dans celles-ci 60 grammes d'or à la tonne, quelquefois même 900 grammes. Toutes ces formations ont été remaniées à l'état d'alluvions, souvent très anciennes.

Des formations analogues existent dans l'**Inde** : elles sont actuellement abandonnées. On y rencontre des imprégnations aurifères très étendues. Dans le district de **Wainad**, elles constituent d'innombrables petites veines parallèles, lenticulaires, obliques sur les strates des gneiss encaissants, accusant le caractère nettement dynamique et intrusif de la formation.

Au **Transvaal**, outre les conglomérats aurifères du Witwatersrand, on trouve dans l'Est des gisements d'or qui peuvent être rattachés au groupe

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

des imprégnations diffuses et des filons-couches en terrains métamorphiques (districts de **Lydenburg** et de **Barberton**). Ces gisements ont été les premiers découverts ; ils ont donné d'excellents résultats (mine fameuse de la Shéba). On y rencontre des veines de quartz, à allure de pseudo-filons sans continuité qui renferment de l'or ayant subi une altération superficielle intense. On a donc eu de belles cristallisations d'or ; ce sont des minerais très inconstants, mais donnant localement des teneurs élevées. Le quartz aurifère est vitreux, de teinte sombre, noirâtre ou bleuté, rubané par des inclusions de pyrite très fines, souvent bréchiforme ; en profondeur, il contient des sulfures métalliques (fer, cuivre, zinc, plomb) avec stibine et mispickel ; à la surface, ces minéraux ont disparu par altération et on observe un quartz oxydé, brûlé, carié, plein de cavités et de fissures, dans lesquelles apparaissent des grains d'or natif.

Les mêmes formations se rencontrent plus au Nord dans l'hinterland du **Mozambique**, dans la **Rhodésia**, etc... On y a trouvé, lors de la découverte du pays, des exploitations anciennes, qui avaient été très célèbres et qui n'ont généralement pas pu être reprises ; de là venait certainement l'or que, de temps immémorial, les indigènes apportaient à la côte. Les gisements de la Rhodésia, malgré les déboires, ont fourni quelques bons résultats.

A **Madagascar**, les terrains cristallophylliens renferment de très nombreuses imprégnations aurifères ayant pu faire illusion sur l'avenir industriel de bien des gisements qui n'ont donné que des déboires. L'or est parfois inclus dans les gneiss, sans être associé à la pyrite. Ces gisements ont donné naissance à d'innombrables alluvions aurifères.

Dans l'**Afrique Centrale** (Soudan, Dahomey, Sénégal, Côte de l'Or, Darfour, Congo), doivent exister des imprégnations aurifères, auxquelles il faut probablement attribuer l'origine de beaucoup d'alluvions aurifères.

En *Amérique du Nord*, des types analogues sont connus depuis longtemps dans la zone de terrains cristallophylliens qui bordent à l'Est et à l'Ouest la grande plate-forme canadienne. A l'Est, ce sont les gisements qui s'échelonnent le long de l'Atlantique, entre la Nouvelle-Ecosse et la Géorgie. A l'Ouest, c'est, dans les Black Hills, les gisements du **Dakota**, qui sont constitués par des zones d'imprégnation assez pauvres, au milieu de chloritoschistes, d'amphibolites (pyrite aurifère avec pyrrhotine et mispickel). A **Homestake**, la pyrite aurifère se concentre en une sorte d'amas, dont le minerai, exploité à ciel ouvert et en profondeur, renferme 6 grammes d'or à la tonne environ ; c'est probablement la mine du monde qui traite la plus grande quantité de minerais à basse teneur (près de 2 millions de tonnes par an).

En *Amérique du Sud*, où, à partir de Panama, deux branches de plissements récents se dirigent, l'une vers la Côte Pacifique, l'autre vers la Côte Atlantique, enserrant entre elles des massifs anciens, nous rencontrons à la fois des gisements tertiaires et des gisements anciens. Ceux-ci consistent surtout en des types d'imprégnations diffuses et de filons minces.

En **Guyane**, les imprégnations portent sur des schistes cristallins. Les altérations continentales ont donné, sur l'affleurement des petites veines aurifères, des formations latéritiques, au sein desquelles les veinules de quartz aurifères se sont isolées de leur roche encaissante, puis sans doute nourries

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

d'or emprunté aux zones supérieures, aujourd'hui disparues (Roche à ravets). Ces gisements d'altération ont été remaniés dans les alluvions.

Au **Brésil,** on connaît de même de grandes imprégnations de pyrite aurifère passant par altération aux hématites aurifères. Dans certains micaschistes, les imprégnations prennent l'allure d'un *vernis doré* recouvrant les plans de schistosité. Les mispickels aurifères sont fréquemment associés à la tourmaline.

Enfin des formations analogues, mais restreintes, se rencontrent souvent quand des massifs anciens sont mis au jour par l'érosion, au cœur de plissements récents, par exemple dans les *Alpes.* La région du Mont-Rose a fourni les éléments des placers de la Haute-Italie. Des veines aurifères en place ont été trouvées à **Val Toppa** (fig. 166) et ont fait l'objet d'exploi-

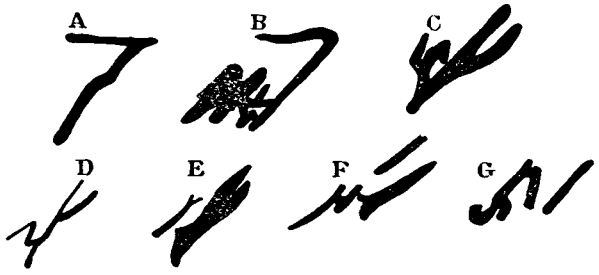


Fig. 166. — Coupes successives (de 50 en 50 mètres) des veines aurifères du Val Toppa.

tations satisfaisantes. Des coupes faites de 50 en 50 mètres montrent l'existence, au milieu de schistes talqueux, de veines interstratifiées, de faible longueur, très irrégulières, sans racines profondes bien caractérisées. Elles contiennent de la pyrite aurifère et du mispickel. Les teneurs sont faibles (moyenne d'environ 11 grammes à la tonne, dont on retirait 85 %).

Il y a, dans les Alpes, un très grand nombre d'autres gisements. **A Gondo** (descente du Simplon), on trouve des gneiss, des schistes avec veines interstratifiées de pyrite cuivreuse, de galène, contenant un peu d'or ; mais ces gisements sont généralement à la limite d'exploitabilité actuelle ; ils pourront devenir intéressants quand celle-ci baissera.

Dans les **Hohe-Tauern,** il y a une série de mines, exploitées activement au xv^{e} siècle, reprises parfois de nos jours.

III. — FILONS MINCES ET MULTIPLIÉS TYPES PRIMAIRES

On passe insensiblement du type précédent à ce nouveau type, où les poches, les veines, les filons mieux caractérisés peuvent présenter une certaine continuité qui leur a donné parfois une grande valeur industrielle. Ces filons, groupés en faisceaux et parallèles les uns aux autres, sont généralement encore minces et irréguliers.

Ce groupe est également développé dans les régions anciennes influencées par des mouvements calédoniens et hercyniens et paraît être le type ancien, donc profond, des filons aurifères. Dans les massifs hercyniens,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

on trouve souvent de grands champs de fractures avec veines aurifères, ayant l'aspect de filons minces et nombreux. Ils sont en relation avec des granulites, des pegmatites, des aplites, et associés à des gisements d'étain ou avec le groupe de ce métal. On y voit quelquefois apparaître un peu de plomb, de cuivre, etc...

Bérézowsk (fig. 167) est l'une des mines les plus anciennes de l'*Oural*, exploitée depuis le XV^e^ siècle et à peu près épuisée actuellement. Il y a là une innombrable quantité de fractures à travers des granites porphyroïdes et les terrains avoisinants. Ces fractures sont occupées par des filons minces d'une sorte de granulite (greisen) composée de quartz et de mica et qu'on appelle bérézite. Les filons de la bérézite eux-mêmes présentent une foule de petites craquelures transversales dont le remplissage est fait par du quartz, de la pyrite aurifère, de la galène, de la chalcopyrite, des sels de bismuth (bismuthine), de la tourmaline chromifère et de la crocoïse (chromate de plomb). Les filons de granulite peuvent atteindre 10 kilomètres de long avec une largeur de 2 à 10 mètres ; quant aux veines de quartz aurifère, elles ont généralement quelques centimètres de large (rarement 1 m.). Il s'agit bien d'un phénomène filonien : il y a eu ouverture de fentes et minéralisation par des eaux thermales à minéralisateurs énergiques.

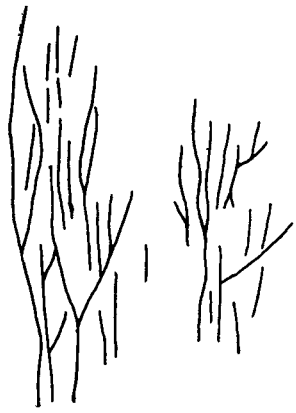


Fig. 167. — Plan schématique des filons de Bérézowsk (Oural).

On peut encore citer dans l'Oural le gisement de **Kotchkar**, formé par une série d'innombrables craquelures (5 cm. à 2 mètres de largeur). On voit le granite encaissant, recoupé par ces fractures. Elles contiennent de la *pyrite*, de la *stibine*, du *mispickel* aurifères, avec gangue de quartz. C'est l'association typique des minerais connexes de la granulite.

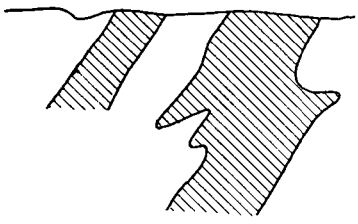


Fig. 168. — Coupe longitudinale du principal filon de Kolar (Champion Reef) avec ses colonnes d'enrichissement.

Dans l'**Inde**, ce type est le seul qui ait donné lieu à des exploitations intenses. Il y a là un énorme massif ancien, n'ayant subi que des mouvements localisés à l'époque silurienne et carbonifère. Les couches de Gondwana s'y sont déposées horizontalement. Des imprégnations diffuses très nombreuses ont donné lieu vers 1881 à une fièvre de spéculation ayant abouti à un désastre. Cependant le district de **Wainad** a été exploité fructueusement pendant quelques années ; son plan est tout à fait analogue à celui de Bérézowsk et de Kotchkar (Oural). Le champ de fractures de **Kolar** a été intéressant parce qu'on y a trouvé quelques grandes fractures continues qui ont permis une exploitation durable (fig. 168). On y observe le remplissage ordinaire : pyrite,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

pyrrhotine, blende, galène, chalcopyrite, tourmaline. Les minerais sont disposés par colonnes dans le plan du filon, séparées par des zones stériles. Le quartz aurifère est sombre, gris bleu, avec un éclat vitreux ; sa structure est laminaire. L'or y est invisible en général ; on peut toutefois trouver quelques grains d'or natif isolés et rares. Ce type de filons se retrouve dans une foule de régions : Brésil, Uruguay, Australie orientale.

En **Annam** et au **Laos**, quelques gisements aurifères du même type ont donné lieu à des tentatives d'exploitation, comme par exemple à *Bong Miu*, à 100 kilomètres de Tourane. La granulite a déterminé la présence à la fois de minerais d'or et d'étain.

Dans l'**Australie orientale**, on peut rattacher au type de filons minces des gisements très riches. L'âge des filons y est bien déterminé (milieu du Carbonifère) ; ils ont été remaniés et ont formé des placers à l'époque crétacée. Ils se trouvent dans les Etats de Victoria et de New-South-Wales.

Ceux de l'Etat de Victoria (plus de 3.000) sont encaissés dans le Silurien et se trouvent dans des conditions variées.

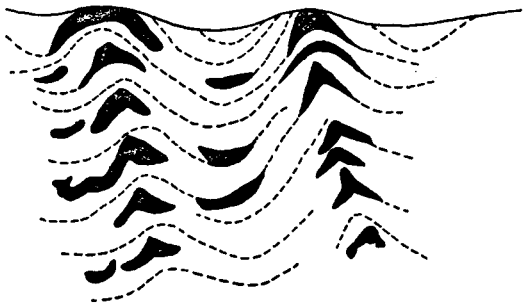


Fig. 169. — Coupe de Bendigo (Australie) montrant des lentilles anticlinales et quelques lentilles synclinales.

Il y a de grands filons, suivis jusqu'à 1.200 et 1.300 mètres de profondeur sans variations notables. Les principaux gisements sont à *Ballarat* et à *Bendigo*. A **Ballarat**, les filons affleurent selon des traits rigoureusement parallèles et discontinus.

Les gisements de **Bendigo** sont en selles et se présentent sous la forme de veines aurifères empilées qui ont rempli les bâillements des schistes, le long des charnières anticlinales. Il y en a quelquefois, mais de plus petites, le long des synclinaux (fig. 169).

Le remplissage est constitué par du quartz et de la pyrite aurifère avec un peu de blende et de galène.

En **Egypte**, le long des côtes de la Mer Rouge, où on a retrouvé à Um-Rus d'anciennes exploitations qui n'ont pas pu être reprises, les gisements aurifères consistent en filons minces en rapport avec des granulites et des pegmatites traversant des gneiss.

Au **Brésil**, on observe toutes les transitions entre les imprégnations et les filons minces où le *mispickel aurifère est associé à la tourmaline.*

Gîte du Callao (*Venezuela*). — Le gisement du Callao est aussi de ce type

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

il a été découvert en 1884 et a eu un moment de richesse exceptionnelle.

Ce gîte s'est présenté sous la forme d'une lentille columnaire de minerais intercalée dans des schistes métamorphiques. Les courbes de niveau de cette lentille ont été tracées sur la fig. 170. En son centre et en quelque sorte suivant le thalweg du milieu de la lentille, on trouve les parties les plus riches ; il est probable que leur richesse est due à un phénomène d'enrichissement postérieur. On a trouvé qu'il existait des quartz aurifères en surface, des pyrites en profondeur.

Enfin ces gisements se rencontrent aussi en *Europe*, d'ailleurs avec une bien moindre importance industrielle. Certains massifs primaires, craquelés au Silurien et au Carbonifère, présentent des gisements aurifères en relation avec de la granulite et même avec de la microgranulite. L'or se présente comme une sorte d'accident dans le groupe stannifère ; il est associé à l'étain, exceptionnellement au cuivre, à la stibine et au mispickel.

En **France**, les mines sont de ce type. La mine de **La Bellière** (*Maine-et-Loire*) contient du mispickel aurifère, formant des veines encaissées dans les terrains cristallophylliens. La mine de **La Lucette** (*Mayenne*) a été la première mise en valeur ; elle exploite un filon de stibine avec mispickel et or ; celui-ci se trouve surtout dans le mispickel, mais aussi dans la stibine. La mine du **Châtelet**, près Evaux (*Creuse*), se trouve en rapport avec un grand filon de quartz, suivi sur 60 kilomètres de longueur, probablement du Carbonifère moyen et en relation avec une venue microgranitique. Ce grand filon est stérile ; mais les petites veines pyriteuses latérales (leaders) ont donné lieu, au Châtelet, à des exploitations fructueuses. A **Bonnac** (*Cantal*), on a essayé de reprendre de même des mispickels aurifères.

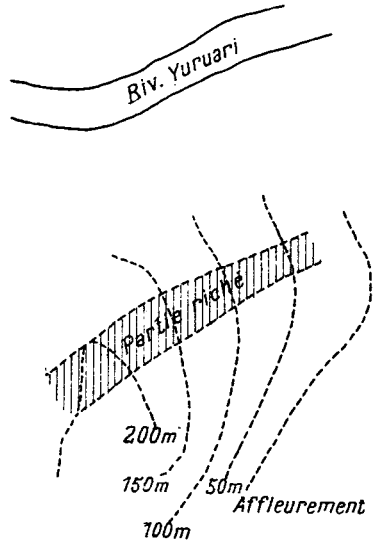


Fig. 170. — Schéma du gisement du Callao (Venezuela).

En **Bohême** (Eule), dans le **Pays de Galles**, dans le Nord-Ouest de l'**Espagne**, on connaît également ce type qu'on peut appeler *hercynien* par opposition au précédent qu'on peut appeler calédonien et au suivant qui sera tertiaire.

IV. — GRANDS FILONS TERTIAIRES AURO-ARGENTIFÈRES

Ces gisements dessinent des traînées presque continues le long des chaînes tertiaires à manifestations éruptives récentes. Ils sont constitués par de grandes fractures filoniennes souvent bréchiformes, avec remplissage nettement hydrothermal de quartz, de ciment auro-argentifère,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

associé à de la galène abondante, de la blende, de la pyrite, du mispickel, quelquefois de la chalcopyrite. C'est, en somme, un cas particulier des B. P. G. A côté de ces grands filons, très larges, très longs et très nets, on trouve également des filons coincés en profondeur, formés de veines irrégulières, ramifiées en stockwerk, et en relation avec des roches éruptives, microgrenues ou microlithiques. Il peut y avoir association de l'or avec des roches sodiques, avec des tellurures (1), de la fluorine.

Tous ces filons où l'or est en quantité inférieure à l'argent sont exploités, tantôt pour l'or, tantôt pour l'argent comme à Leadville. Souvent les minerais sont difficiles à traiter, le cuivre étant une gêne au traitement par la cyanuration.

Nous citerons d'abord les gisements de **Californie** qui se trouvent dans la région montagneuse du flanc Ouest de la Sierra Nevada. Il y a là l'un des plus grands filons connus du monde, le *Mother Lode*, qui a 110 kilomètres de longueur et qui est aurifère sur tout son parcours. Mais ce n'est pas la grande masse quartzeuse qui est aurifère ; ce sont les « leaders », veines beaucoup plus minces où se sont concentrés les métaux et particulièrement l'or. Les filons californiens proviennent du remplissage de fractures, de décrochements traversant tous les terrains ; leur largeur est variable (de 1 mètre à 100 mètres) ; la richesse en or augmente en général en même temps que la largeur diminue. Le remplissage est constitué par du quartz venu certainement en plusieurs fois : on trouve du quartz de première venue, broyé et recimenté par du quartz de deuxième venue. La partie la plus riche est rubanée, bleuâtre ; le quartz y a souvent pris une allure caverneuse, surtout dans les parties hautes ; cette allure caverneuse est due au départ de la pyrite. Le grand filon de Californie comprend, outre la pyrite aurifère, de la galène, de la blende, du mispickel, de la chalcopyrite, quelquefois même un peu de cinabre. On y a parfois signalé un peu de tellure. Là comme partout, l'or libre disparaît en profondeur.

Ce type se retrouve, mais avec des dimensions moindres, sur le plateau du **Mexique**, où les filons quartzo-auro-argentifères sont très développés ; mais la proportion de métaux associés à l'or y est plus grande.

Il se retrouve aussi en **Amérique du Sud** (Colombie, Pérou, Bolivie), où l'on voit apparaître des types granulitiques plus profonds.

Des types semblables, d'âge tertiaire, existent en outre sur tout le pourtour du Pacifique : Sumatra, Japon, Philippines, Célèbes, Nouvelle-Zélande.

Le **Japon** a été autrefois très riche en or ; les parties riches ont déjà été exploitées il y a plusieurs siècles. Ce sont des formations quartzo-auro-argentifères dont quelques-unes, suivant la teneur, sont considérées comme urifères ou comme argentifères. Les principaux gisements se trouvent ans l'île de *Sado*, à *Tagonaï*, etc.

A **Célèbes**, quelques mines ont des teneurs énormes, mais ne peuvent as toujours être exploitées, à cause de la présence du sélénium.

En **Nouvelle-Zélande**, les filons sont en rapport direct avec des roches éruptives tertiaires (andésite, dacite,...).

(1) Les filons renfermant l'or à l'état de tellurures feront l'objet d'une étude spéciale.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les formations de ce genre sont rares en *Afrique*. Mais, dans le Nord de **Madagascar**, à *Andavakoera*, on connaît des associations analogues de minerais aurifères, venant le long de roches éruptives sodiques (quartz, pyrite aurifère ou or natif en surface, sulfures complexes). On y rencontre des fissures incomplètement fermées dont les parois sont tapissées de cristaux de quartz et d'or, véritables cheminées aurifères à teneur élevée.

Dans les **anciens Etats hongrois**, plusieurs districts : *Schemnitz* (Tchécoslovaquie), *Nagyag* (Transylvanie), présentent à la fois de grands filons bréchiformes, comparables à ceux de la Californie avec sulfures complexes, et des séries de craquelures qui se prolongent jusque dans le flysch, en rapport avec des roches éruptives tertiaires, et où l'or est fréquemment associé à des tellurures.

Les grands filons paraissent souvent représenter des types plus profonds de fractures tertiaires ; les petites craquelures, des types plus superficiels.

V. — GISEMENTS D'OR ENCAISSÉS DANS LES CALCAIRES

Dans certains cas, assez rares et sans grande importance industrielle, les gisements aurifères, produits par la voie hydrothermale, sont encaissés dans des calcaires et présentent les formes spéciales de gîte primitif ainsi que de remise en mouvement, entraînées d'ordinaire par cette nature de terrains. Les diaclases du calcaire dans les trois directions principales qui débitent la roche en une série de parallélépipèdes, sont alors remplies par des veines métallisées renfermant de l'or avec d'autres métaux.

Tels sont, par exemple, plusieurs gisements du **Transvaal**, dans le district de Marico (*Malmani*), dans le district de *Lydenburg* (*Pilgrim's rest*). L'ensemble de ces gisements, encaissés dans une série dolomitique, semble être en relation avec une série éruptive basique, dite du Boschveld, qui s'intercale entre le groupe primaire et le Karoo. Ils sont constitués par une quantité de veinules dirigées dans tous les sens et généralement verticales, renfermant du quartz aurifère avec souvent de beaux échantillons d'or natif. Les veines semblent avoir été à l'origine formées de chalcopyrite aurifère, qui s'est altérée en surface en malachite, azurite, érubescite, etc. [Le cuivre est une gêne pour la cyanuration]. A la base de la dolomie, on rencontre un horizon schisteux où le manganèse est en association avec la pyrite de fer aurifère et d'où proviennent de belles pépites d'or.

VI. — GISEMENTS DE TELLURURES AURIFÈRES

Les combinaisons tellurées de l'or avec divers autres métaux (argent) jouent un rôle très important et ont constitué récemment deux des plus grands districts aurifères du monde : Kalgoorlie en Australie occidentale et Cripple-Creek au Colorado.

Ces minerais tellurés demandent souvent des procédés de traitement compliqués : aussi les a-t-on négligés longtemps. On les rencontre dans les gîtes de contact, dans les imprégnations diffuses de profondeur, dans les

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

filons minces d'âge primaire, dans les filons tertiaires, donc dans des gisements d'âges et de natures très divers.

En **Transylvanie,** de grandes dislocations tertiaires ont été suivies par des roches éruptives (andésite, dacite, trachyte) et par des métallisations connexes. La métallisation est surtout formée de quartz avec pyrite et tellurures aurifères, puis, à titre subordonné, de B. P. G. et d'argent rouge. Certains filons sont bréchiformes. Ils semblent s'appauvrir en profondeur. Enfin la roche éruptive est souvent kaolinisée à son contact avec le filon et alors elle est traversée par d'innombrables veines métallifères **(Nagyag, Offenbanya).**

En **Australie occidentale,** le champ d'or de Coolgardie fut découvert en 1892, au milieu d'une région désertique. Il s'agit d'une plate-forme précambrienne de terrains métamorphiques plissés et de granite. La minéralisation aurifère (sulfures, tellurures, séléniures métalliques) paraît avoir imprégné, à l'époque précambrienne, des zones de broyages analogues à des fahlbandes, des schistes interstratifiés ou des fractures plus nettes.

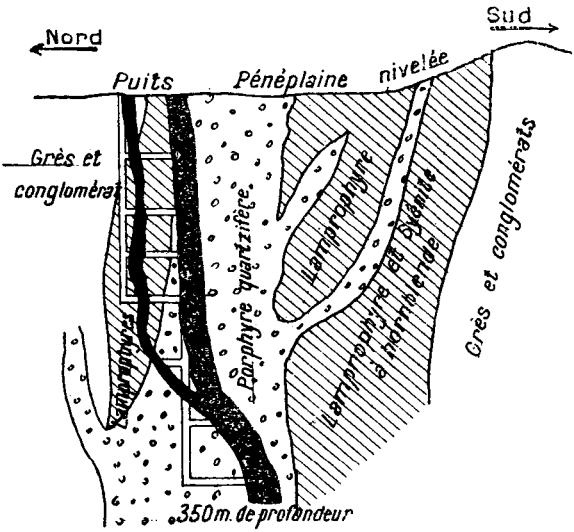


Fig. 171. — Coupe de la mine Teck-Hughes.

Cette série de phénomènes rentre dans les imprégnations diffuses avec quelques particularités :

a) La netteté des dislocations ;

b) La minéralisation riche en tellurures.

A **Coolgardie,** on a, à la fois, des filons de quartz innombrables, courts et irréguliers, recoupant le granite et renfermant des sulfures divers, et des bandes métallisées avec ciment de tellurures. A **Kalgoorlie,** il en est de même. Le sélénium s'associe à l'or dans ces gisements.

Au **Colorado,** le gisement de **Cripple-Creek** est situé vers 3.000 mètres d'altitude, dans une région d'activité volcanique tertiaire au milieu de granites. Le volcanisme s'est traduit par des formations de brèches énormes,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

par des dykes et coulées de phonolithe, syénite néphélinique, trachyte et autres roches franchement sodiques. Les minerais, localisés dans cette zone volcanique, remplissent des fissures minces rayonnantes ; les filons sont courts, très irréguliers, groupés en faisceaux. La métallisation consiste en tellurures d'or et d'argent, pyrite probablement aurifère, chalcopyrite, cuivre gris argentifère, stibine, rarement galène et blende. A la partie superficielle, les tellurures ont été éliminés pour faire place à l'or libre. La gangue est formée de quartz et fluorine. Parfois on trouve des cheminées d'explosion verticales, en plein « basalte », remplies de fragments basaltiques cimentés par du tellurure d'or et une gangue calcaire.

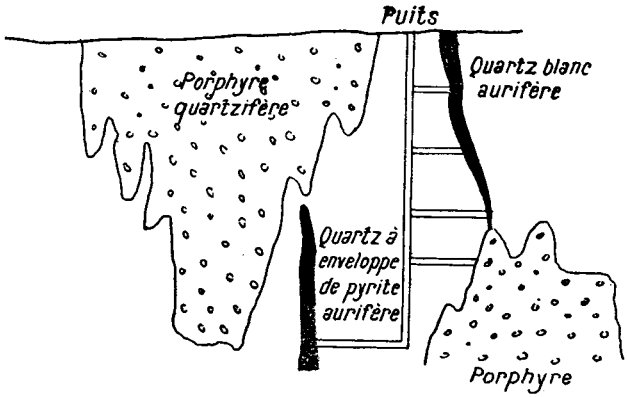


Fig. 172. — Coupe verticale à Porcupine (Ontario Est).
Les parties laissées en blanc sont formées de grauwacke.

Au **Canada,** dans le district de **Kirckland Lake** (Ontario), à 40 kilomètres Nord des filons cobalto-argentifères de Cobalt, une série de roches ignées (Algonkien), comprenant des lamprophyres et des syénites à hornblende, traverse les conglomérats et grauwackes de Temiskaming (fin du Laurentien). Son dernier terme, le plus acide, est une syénite porphyrique rouge, de laquelle dérivent des veines sinueuses de quartz aurifère. L'or natif s'y trouve englobé dans un tellurure de plomb et dans de la pyrite. Les deux coupes schématiques ci-jointes 171 et 172 représentent l'allure de ces veines. Sur la seconde, où l'on voit nettement le quartz dériver du porphyre quartzifère, ce quartz ne s'enrichit en or qu'en s'en éloignant vers la surface. L'âge de ces gisements paraît s'intercaler dans le précambrien.

La principale mine de Kircklan Lake est Lake Shore.

VII. — CONGLOMÉRATS AURIFÈRES

Cette catégorie spéciale de gisements à allure stratifiée ne semble pas toujours résulter d'une préparation mécanique normalement sédimentaire ; on peut leur supposer une autre origine : une pénétration postérieure de liqueurs aurifères dans les interstices du conglomérat encore meuble

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Il s'agirait donc d'une sorte d'imprégnation hydrothermale qui aurait pris une allure spéciale par suite de la nature du terrain encaissant et qui serait tout à fait comparable à celle donnant naissance aux gisements filoniens ou aux imprégnations diffuses.

Gisements du Witwatersrand (*Transvaal*). — Ils ont une importance considérable (plus de 1 milliard de francs-or par an, soit moitié de la production totale).

Ils ont été découverts en 1887 et ont provoqué un développement rapide et considérable du pays. On a rencontré au début quelques alluvions aurifères qui ont attiré l'attention, mais en somme très peu importantes, en raison même de la petite quantité d'eau courante existant dans le pays. On a trouvé ensuite l'or natif sur les affleurements ; en deux ou trois ans, on a vidé tout ce qui existait comme or natif et, en s'approfondissant, on est tombé sur des minerais difficiles à traiter ; heureusement, à ce moment.

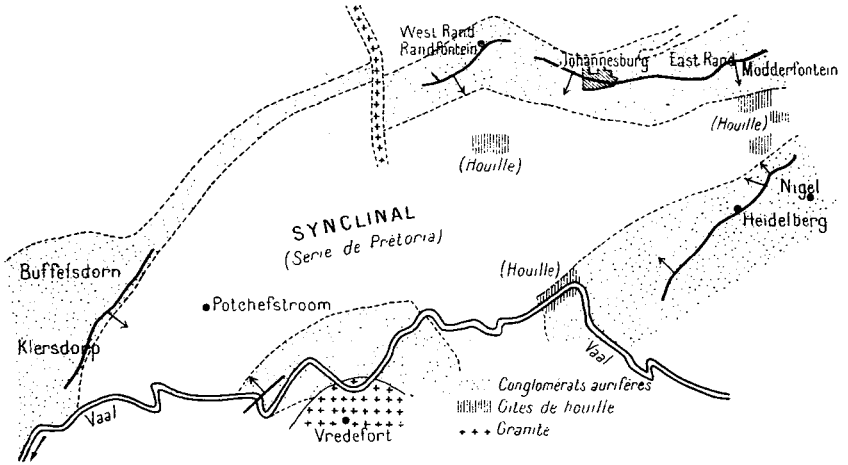


Fig. 173. — Carte schématique du gisement du Witwatersrand (Transvaal).

on a découvert le procédé de cyanuration qui convenait parfaitement à ces minerais.

Les couches de conglomérats sont situées dans les terrains primaires. Ces terrains sont plissés, redressés et recouverts en discordance par la série horizontale du Karoo. Le plissement correspond grossièrement comme âge à celui des plissements calédoniens d'Europe. Le Karoo (Permien, Trias, Infralias) est une formation lacustre, saumâtre, avec quelques roches éruptives ; il contient de nombreux et importants gisements de houille. A l'Est du Witwatersrand, plusieurs mines exploitent la houille en haut et l'or en bas.

La formation aurifère comprend des schistes, des quartzites, des conglomérats, avec intercalations de granites, de granulites, de gabbros, de norites. Il y a eu un métamorphisme très net qui indique un retour en profondeur ; la venue de l'or peut être en relation avec ce phénomène de métamorphisme.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

L'or, à l'état de pyrite aurifère, se trouve presque exclusivement dans le ciment des conglomérats. La proportion d'or et de pyrite contenue dans le ciment dépend de la grosseur des galets. Les conglomérats les plus riches sont ceux où les galets ont la grosseur d'une noix. Quand les galets sont plus gros, l'or est disséminé en paquets d'une façon irrégulière. Quand le grain devient plus fin et que le conglomérat passe à un grès, la teneur en or du ciment devient généralement moindre (sauf dans la région Est) et bien souvent ne permet pas l'exploitation. Les galets eux-mêmes sont à peu près stériles.

La plupart des mines se trouvent sur une zone de 25 kilomètres de long passant par la ville de Johannesburg qui a été fondée sur les gisements eux-mêmes.

Les couches aurifères ne sont pas rigoureusement continues ; elles forment, en réalité, une série de longues lentilles que l'on identifie très hypothétiquement les unes avec les autres.. Dans la région Est, les couches sont recouvertes par le Karoo ; on les suit jusqu'au groupe de Modderfontein ; leur prolongement n'est pas exploité. Dans l'Ouest, on trouve les mines de Randfontein ; puis, après une interruption de 80 kilomètres environ, celle de Buffelsdorn et Daggafontein. La plus grande richesse se trouve dans la région centrale de Johannesburg. Toutes les couches plongent vers le Sud ; mais on les voit réapparaître au Sud-Est avec un plongement inverse dans le Nigel. Il semble donc qu'il y ait en profondeur toute une série de couches aurifères, encore inexploitées, en forme de cuvette très profonde.

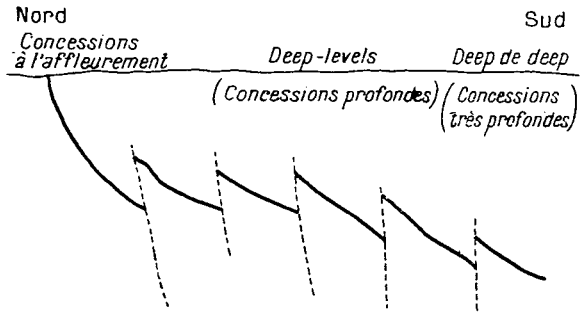


Fig. 174. — Coupe schématique montrant la descente par échelons de la couche aurifère du Witwatersrand.

En dehors de cette formation, il y a, au-dessus et au-dessous, d'autres couches aurifères appartenant à des niveaux un peu différents, beaucoup moins importantes, moins riches, difficilement exploitables. Ainsi, dans le Black Reef qui a donné lieu à beaucoup de déboires, la formation précédente a été remaniée ; on y a trouvé, dans certaines rigoles, de grands amas très riches qui se sont épuisés rapidement.

En coupe (fig. 174), on voit la formation aurifère plonger plus ou moins rapidement ; elle est recoupée par une série de failles inverses ; le résultat a été que certaines parties de concessions ont vu leur puissance doublée.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Quand on s'est aperçu que les couches, au lieu d'être à peu près verticales, diminuaient d'inclinaison en profondeur, on a pris une série de concessions (*deep-levels*) qui n'ont pas d'affleurement au jour. On a encore peu mis en exploitation la tranche suivante (*deep de deep*) où les puits devront atteindre et dépasser 2.000 mètres de profondeur.

Le mode d'exploitation a consisté longtemps à descendre un puits incliné le long de la couche et à pratiquer une série de galeries transversales. On emploie aujourd'hui des puits verticaux et les exploitations dépassent 2.000 mètres de profondeur.

L'usage est de faire de distance en distance, le long des galeries, une prise d'essai ; on peut ainsi dresser des courbes, représentant l'épaisseur du filon, la teneur en or, le rendement (fig. 175). On constate ainsi que, malgré la réputation de régularité extrême attribuée à ces gisements, la *teneur en or* varie fortement. On a soutenu que cette teneur était en relation avec la présence de dykes intrusifs ; il y a

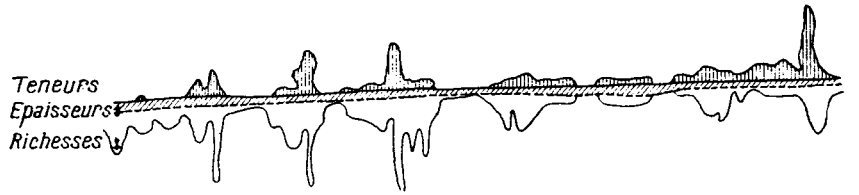


Fig. 175. — Coupe représentant la variation des teneurs, des épaisseurs et de la richesse dans une galerie de mines du Witwatersrand.

en effet une coïncidence partielle dans quelques mines ; mais cette coïncidence ne se reproduit pas dans les autres. Il semble aussi que la teneur soit plus forte là où les couches sont verticales et moins forte là où les couches sont horizontales.

La teneur en or est généralement très faible ; les mines les plus riches tenaient 25 grammes d'or à la tonne. La teneur moyenne s'est abaissée avec le temps ; cela tient en grande partie à des conditions industrielles ; au fur et à mesure que la vie de la mine se prolonge, le prix de revient descend et on peut exploiter des couches considérées autrefois comme stériles. Il reste encore d'énormes réserves de minerais trop pauvres pour le prix de revient actuel qui pourront fournir une ressource dans l'avenir. La diminution de la teneur paraît cependant parfois réelle, mais d'une façon différente, en ce sens qu'il y a généralement alternances de zones riches et de zones pauvres.

La série aurifère proprement dite repose d'une façon constante sur une couche de grès rougeâtre (le Red Bar) qui sert de couche repère. Cette série est constituée de 5 couches de conglomérats aurifères séparées par des quartzites stériles : le North Reef, inexploité, le *Main Reef*, gros banc ayant jusqu'à 8 mètres d'épaisseur, dont la teneur ne dépassant guère 8 grammes à la tonne, est à la limite d'exploitabilité, le *Main Reef Leader*, dont la teneur varie entre 10 et 35 grammes, d'environ 60 centimètres d'épaisseur, le Middle Reef, inexploité, et le *South Reef*, la couche la plus riche (15 à 40 grammes), d'environ 1 m. 30 d'épaisseur.

L'*origine de l'or* dans ces conglomérats est très discutée. On a cru d'abord

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

à des placers d'âge silurien, provenant de la destruction de filons aurifères ; cette théorie est difficilement soutenable : l'or se trouve exclusivement dans le ciment et les galets sont toujours stériles ; de plus, au lieu d'avoir une couche riche, unique ou à la rigueur double, le long du bed-rock, comme dans le cas des alluvions, on trouve une dizaine de couches dont 3 ou 4 exploitées.

On a parlé aussi d'une origine sédimentaire contemporaine du dépôt ; il y aurait eu, sur le littoral marin ou dans un fleuve, préparations mécaniques de roches continentales ; les quartz seuls auraient subsisté, avec l'or qu'ils pouvaient contenir.

Une autre théorie, plus vraisemblable, est celle d'une pénétration interne postérieure (imprégnations diffuses). Il y aurait eu des venues hydrothermales de pyrites aurifères, en relation avec les roches éruptives ; elles seraient solidaires du métamorphisme ; on expliquerait ainsi la relation très nette entre la teneur en or et la grosseur des galets. La grosse objection est l'énorme étendue sur laquelle cette formation garde ses caractères.

On connaît des formations analogues, beaucoup moins importantes d'ailleurs, dans d'autres régions.

Dans la **Côte de l'Or anglaise** (Pays des Ashantis), on retrouve des conglomérats aurifères tout à fait semblables à ceux du Transvaal, mais qui sont loin d'offrir la même régularité ; la région est malsaine et a été difficile à mettre en valeur. Les conglomérats sont formés de galets de quartz stériles, reliés par un ciment ferrugineux où existe de l'or natif ; ils sont en relation avec des filons de quartz aurifère. La teneur moyenne est très faible (6 grammes) ; très exceptionnellement, elle a été en surface de 30 grammes.

Dans la **Rhodésia** (Mashonaland), on exploite quelques conglomérats aurifères composés de galets de granite, quartzite, avec ciment quartzeux renfermant de la magnétite et de la pyrite.

Enfin il existe des conglomérats aurifères où l'or est inclus dans les galets quartzeux et provient nettement de la destruction de filons aurifères. Ce type doit être rattaché aux formations alluviales, purement sédimentaires (conglomérats de *Grenade*, du *Gard*, du *Piémont*, etc.).

VIII. — ALLUVIONS AURIFÈRES

Longtemps, ces gisements ont joué le principal rôle dans l'exploitation de l'or, mais cet état de choses a disparu presque partout. Ce qui reste actuellement, ce sont surtout des alluvions anciennes provenant du remaniement d'alluvions de plateaux qui elles-mêmes viennent de la démolition de filons.

On a déjà vu précédemment les lois générales de ces formations (1). Nous nous bornerons donc ici à un rappel sommaire.

Les alluvions aurifères sont rares dans les terrains anciens, comme tous les terrains continentaux particulièrement exposés aux érosions ; les plus nombreuses correspondent au régime des vallées actuelles ou des vallées

(1) Page 64.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

qui les ont immédiatement précédées. Quelques-unes, recouvertes par des coulées de basalte, ont été protégées (Californie, Australie, Sibérie). En moyenne, à chaque stade de creusement et, par conséquent, de préparation mécanique, il s'est produit un enrichissement.

D'une façon générale, il y a concentration de l'or en profondeur : l'alluvion aurifère est particulièrement riche à la base, *au contact du bedrock* ; la richesse varie avec la nature de celui-ci. Quand il est constitué par un schiste dont les rugosités ont arrêté les paillettes, l'alluvion est riche. Quand il est formé par du granite plus ou moins poli qui a laissé glisser les paillettes, l'alluvion est pauvre. Il y a également concentration de l'or en certains points de remous, comme, par exemple, aux coudes de la rivière qui a charrié ces alluvions.

Le nombre des couches aurifères dans les alluvions est toujours très faible (1 ou 2). Elles sont constituées par des graviers qui sont bleus en profondeur (blue gravels), jaunes en surface (yellow gravels).

Enfin, on constate, au sein des alluvions, des phénomènes de nourrissement de l'or par des dissolutions aurifères qui ont donné de grosses pépites dont la forme n'est pas roulée.

On exploite les alluvions aurifères, soit par des exploitations hydrauliques (méthodes du géant) quand elles ne sont pas interdites, soit par des galeries souterraines, soit par des draguages.

Les principales régions d'alluvions aurifères sont la *Californie*, l'*Australie Orientale*, la *Sibérie*, la *Guyane*, l'*Alaska*, *Madagascar*. On a exploité autrefois des alluvions aurifères en *France* (Région Sud des Cévennes, Bretagne, Limousin, Cantal, Rhône, Ariège), dans la *Vallée du Rhin*, en *Espagne*, dans le *Nord de l'Italie* (Sesia, Doire Baltée, Doire Ripaire, etc.).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXIX

PLATINE

est un métal très spécial, très rare, dont le commerce a été, jusqu'à la guerre de 1914, complètement monopolisé et dont la valeur n'a pas cessé alors de s'accroître. D'environ 1.000 francs le kilogramme en 1874, le cours du platine s'est élevé jusqu'à 3.000 francs en 1898, a dépassé 6.000 francs dans les années qui ont précédé la guerre et a même un moment atteint 120.000 francs du fait de la guerre. Actuellement il est bien diminué (5.200 à 6.400 francs-or en 1932).

1. Propriétés et usages. — Le platine doit sa très forte valeur à la fois à sa rareté et à quelques propriétés précieuses :

très grande *ténacité* (surtout quand on l'allie avec une proportion notable d'iridium);

infusibilité dans les fourneaux ordinaires;

inattaquabilité aux acides (sauf à l'eau régale);

inaltérabilité;

éclat comparable à l'éclat de l'argent.

Ces propriétés expliquent les principaux usages du métal :

montage du diamant en bijouterie, fabrication d'alambics pour la concentration de l'acide sulfurique, de fils, de creusets, d'objets de laboratoires (capsules, pinces, etc.), d'instruments de précision, d'appareils de chirurgie, de pointes de paratonnerres, etc.

2. Statistique. — La production mondiale du platine, d'environ 6.000 kilogrammes en 1929, n'a pas encore regagné son niveau d'avant-guerre :

1913	7.100 kgr. de métal fin	1924	4.050 kgr. de métal fin
1916	2.550 » »	1925	5.100 » »
1919	2.400 » »	1927	6.200 » »
1921	1.700 » »	1929	5.970 » »
1923	3.000 » »		

Sur le total actuel, la moitié est fournie par la *Russie* (Région de l'*Oural*) qui eut longtemps le monopole du platine :

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

1860.....	2.300	kilogrammes	1921.....	170	kilogrammes
1870.....	1.760	»	1923.....	1.180	»
1900.....	5.100	»	1924.....	2.070	»
1911.....	5.620	»	1925.....	2.950	»
1913.....	6.530	»	1927.....	3.100	»
1917.....	3.060	»	1929.....	2.900	»
1919.....	1.225	»			

Puis vient la *Colombie* qui produit actuellement environ le 1/4 de la production mondiale :

1913.....	550	kilogrammes	1925.....	1.400	kilogrammes
1916.....	800	»	1928.....	1.650	»
1919.....	1.000	»	1929.....	1.400	»
1921.....	1.050	»	1930.....	1.450	»

L'*Afrique du Sud* (*Transvaal*), dont les gisements ont été découverts depuis peu, produit déjà près du quart de la production totale :

1925.....	170	kilogrammes	1928.....	630	kilogrammes
1926.....	260	»	1929.....	790	»
1927.....	520	»	1930.....	1.400	»

Le *Canada* a donné, en 1929, 390 kilogrammes de métal fin et, en 1930, 1.050 kilogrammes (Production croissante, 1913 : 10 kilogrammes).

Enfin, il y a des productions moins importantes :

Etats-Unis	170	kilogrammes	en 1929 et en 1930 (360 en 1920).
Abyssinie	240	»	en 1929 (20 en 1926).
Japon	45	»	en 1928 (250 en 1920).
Australie	11	»	en 1928 (3 en 1929).

3. Gisements. — I, ALLUVIONS. — Dans **l'Oural,** en **Colombie,** à **Bornéo,** le platine est tiré d'alluvions platinifères provenant de la décomposition de roches très basiques comme les péridotites, norites, dunites, serpentines, où le platine se trouvait primitivement à l'état d'inclusions. Les sables platinifères ne se trouvent jamais bien loin de la roche-mère. Dans l'Oural, on les rencontre à la périphérie des massifs de péridotites et parfois sur ces massifs mêmes (2 centres principaux dans le gouvernement de Perm : la rivière Iss et Nijni-Taguilsk). La couche platinifère repose directement sur le bed-rock à la base des alluvions ; la teneur des alluvions exploitées diminue progressivement, à mesure qu'on est obligé de descendre vers l'aval dans des zones de plus en plus pauvres (teneur moyenne de 2 à 3 grammes par tonne).

II. GISEMENTS DANS DES ROCHES TRÈS BASIQUES (PÉRIDOTITES, DUNITES, SERPENTINES). — C'est le type des gîtes d'*inclusions*. Cette catégorie de gisements, découverts quand on voulut connaître l'origine des alluvions platinifères, contient une teneur, souvent à peine appréciable, de platine et n'est en général pas utilisable. Toutefois, certaines veines enrichies de péridotite très altérée et serpentinisée, au milieu de la péridotite massive, ont pu être exploitées dans l'**Oural.**

C'est à ce type de gisements qu'appartiennent les exploitations récentes

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

du **Transvaal** dont la mise en valeur, après avoir suscité d'énormes espérances, a soulevé des difficultés.

On peut enfin attacher à un type de *ségrégation basique* la présence du platine dans les pyrrhotines nickélifères de **Sudbury**, au *Canada*.

4. Associations. — Le platine est fréquemment associé avec l'*or*, dans ses gisements alluvionnaires, dans certains filons de quartz aurifère de l'Oural et de Colombie. Cette association a permis dans certains cas l'exploitation du platine, là où, s'il avait été seul, il n'aurait pas valu la peine d'être exploité. Il est associé aussi aux *pyrites et pyrrhotines nickélifères et cuprifères* qui contiennent souvent un peu d'or (Canada) ; au *fer*, au *chrome* et, un peu partout, au groupe : *iridium*, *rhodium*, *palladium*, etc.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXX

LES SOURCES THERMO-MINÉRALES ET LES EAUX SOUTERRAINES

1. Définition et utilisation. — En l'absence de définition géologique, physique ou chimique qui convienne à toutes les sources dites thermales ou thermo-minérales et ne convienne qu'à elles seules, nous serons amenés à constater que leur spécification précise est fondée uniquement sur l'usage qu'on en fait ou pourrait faire en médecine, c'est-à-dire sur les vertus thérapeutiques qu'on leur attribue : vertus semblant résulter le plus souvent de la température et de la minéralisation. Leur *thermalité* est certainement leur caractère le plus original ; la plupart d'entre elles sont des sources chaudes. Elles se caractérisent, en même temps, d'ordinaire par l'abondance et la constance relative de leur débit. Comme nous l'avons dit dès le début (1), l'étude des eaux thermo-minérales est liée à celle des gîtes métallifères ; dans beaucoup de cas, ceux-ci ont été formés par celles-là : c'est pourquoi nous avons dû commencer par quelques notions préliminaires sur les eaux souterraines. Réciproquement, l'étude que nous avons faite des filons métallifères peut aider celle des sources thermales.

D'ailleurs l'exploitation des eaux, qu'elles soient ou non thermo-minérales, constitue la mise en valeur d'une ressource minérale au même titre que celle d'un minerai quelconque.

L'étude et l'utilisation de l'eau souterraine ont pris de grands développements dans ces dernières années. Mais, de tout temps, la question de la recherche de l'eau a préoccupé l'homme.

Les Romains ont été particulièrement friands de sources thermales. Ils ont connu et capté la plupart de celles qui se présentent dans les régions occupées par eux : Italie, France, Espagne, Algérie, Asie mineure, etc. Ils ont souvent usé de travaux compliqués, délicats et très rationnels que les modernes ont pu réutiliser comme à Plombières. Aujourd'hui, l'étude chimique et physique des sources thermales a été reprise avec beaucoup de méthode (analyse chimique, recherche des gaz rares et des émanations

(1) Page 16. Voir, sur l'ensemble de la question : L. DE LAUNAY, *Recherche, captage et aménagement des sources thermo-minérales* (Baudry, 1899).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

radioactives). L'étude géologique doit être également très approfondie. Il faut, avant tout, comprendre le mécanisme d'une source si on veut l'utiliser pleinement et la capter sans danger.

2. Origine des eaux souterraines. — Tous les vides un peu profonds dans la terre tendent à se remplir d'eau. Dès les temps primitifs, on a donc fait des puits pour aller chercher de l'eau souterraine. On s'est rendu compte assez vite qu'on pouvait également se procurer de l'eau, dans certains cas, par des galeries horizontales. Les travaux de mine et les tunnels ont amené, d'autre part, à recouper les eaux profondes et ont permis de connaître quelques-unes des lois de leur circulation afin d'en éviter la brusque irruption parfois désastreuse. A une époque plus récente, on est arrivé par des données géologiques à creuser des puits artésiens. Mais le succès même de ces puits à contribué à enraciner la notion inexacte de nappes aquifères, homogènes et continues, assimilables à des surfaces mathématiques. Il ne faut pas oublier que la circulation des eaux souterraines se fait uniquement dans des vides, qui sont seulement plus rapprochés dans des strates sableuses perméables, plus éloignés dans des calcaires, etc. Ces fissures peuvent être capillaires et amener ainsi la stérilisation bactérienne des eaux ; mais les sources particulièrement abondantes des terrains calcaires proviennent, au contraire, de larges vides où elles peuvent rester contaminées. Quant aux sources thermales, nous avons vu précédemment que leur particularité consistait à revenir brusquement d'une grande profondeur par une fracture bien nette.

3. Méthodes d'études des eaux souterraines. — Actuellement, on possède plusieurs méthodes d'étude des eaux souterraines.

I. — Méthode d'exploration directe

Elle consiste à aller voir sous terre comment circulent les eaux. La plus ancienne inscription hébraïque est relative à une recherche de ce genre, faite à Siloé pour alimenter Jérusalem. Nous allons consacrer un paragraphe spécial aux travaux de mines et tunnels. L'exploration spéléologique ne date guère que de nos jours. On a trouvé peu à peu un très grand nombre de rivières souterraines, navigables ; puis des séries de ruisseaux plus petits. Même dans les calcaires marneux, l'eau circule par des fractures de dimensions notables. Ces explorations ont montré, de plus, que les orifices d'entrées des eaux souterraines en pays calcaires servent parfois de dépotoirs aux villages voisins et entraînent des risques permanents d'épidémies typhoïdes, auxquelles on s'efforce en conséquence de parer par des périmètres de protection.

On est amené à admettre un réseau de veines aquifères anastomosées ; les nappes sont simplement les niveaux où les veines sont suffisamment nombreuses pour qu'un puits unique ait chance de les recouper.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

II. — Méthode d'observation par les travaux souterrains

Elle consiste dans l'étude des faits observés incidemment dans de grands tunnels, des mines, etc. (1).

Le *tunnel du Simplon* a été particulièrement instructif et je vais indiquer les principales conclusions que l'on en peut déduire. Les travaux ont, en effet, recoupé de puissantes fractures aquifères et ont montré comment les eaux chaudes et froides se rencontrent parfois dans les mêmes fissures, se refoulent, tantôt les unes, tantôt les autres, et arrivent à un moment, par des réseaux de fissures plus ou moins compliquées sur le front de taille du tunnel. Ainsi dans une grande fracture verticale, il arrivait de l'eau chaude par en bas, de l'eau froide par en haut. Les réserves d'eau froide étaient limitées ; celles d'eau chaude étaient beaucoup plus considérables. L'eau chaude peut venir là par plusieurs trajets (fig. 176) ; le trajet 1, le plus court ; un autre trajet 2, plus long, qu'elle adopte si on l'empêche de suivre le trajet 1.

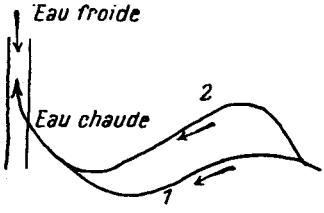


Fig. 176. — Schéma des arrivées d'eaux froides et d'eaux chaudes au Simplon dans une même fissure. Multiplicité des trajets pour les eaux chaudes par exemple.

Ce tunnel a rencontré de grandes nappes de charriage, affectant des schistes avec intercalations calcaires. L'ensemble des couches y est à peu près horizontal. Au contraire, au Saint-Gothard et au Mont-Cenis, on avait trouvé des couches verticales. Ce contraste a permis de constater que la température augmente beaucoup plus vite en profondeur quand les couches sont horizontales parce que l'influence réfrigérante des hautes cimes se fait alors beaucoup moins sentir.

Les venues d'eau du Simplon ont été en relation avec les fractures ; les sources les plus volumineuses sont venues exclusivement de terrains fissurés et de terrains solubles. Les eaux que l'on a rencontrées étaient, tantôt chaudes (45°), tantôt à la température moyenne du lieu, tantôt froides (10° ou 15°, la température de la galerie étant de 30° environ).

On a constaté également que la température ne s'est pas accrue régulièrement suivant la loi du degré géothermique. Les venues d'eaux froides refroidissent le rocher au contact, les venues d'eaux chaudes le réchauffent. Il y a ainsi une série d'anomalies de températures. Ce fait peut trouver son application aux filons métallifères. A la hauteur d'une venue d'eau froide, il peut y avoir précipitation des liqueurs métallifères : par exemple, à l'intersection d'autres filons ou de croiseurs stériles. D'où possibilité d'enrichissement immédiat, sans parler des enrichissements par altération.

(1) Je me borne ici à un résumé très sommaire de cette question que j'ai eu l'occasion d'étudier plus complètement dans mon *Traité des Sources thermo-minérales* (Baudry, 1899) et dans mon Cours à l'École des Ponts et Chaussées (J. Baillière, 1922).

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

A 4 kilomètres de la surface, on a recoupé au Simplon une première faille donnant une venue d'eau chaude considérable qui a arrêté les travaux pendant plusieurs mois ; 25 mètres plus loin, on a retrouvé une seconde faille avec une zone de broyage amenant jusqu'à 1.200 litres par seconde et arrêtant à nouveau les travaux. C'est par cette faille qu'arrivaient à la fois des eaux chaudes et des eaux froides.

Les eaux souterraines ont toutes leur pression propre, en fonction de leur distance verticale au point d'infiltration ; elles prennent, par suite, un état d'équilibre. On voit ainsi comment, quand on trouble cet équilibre, les circuits souterrains peuvent se trouver dérangés, et, si l'on s'y prend maladroitement dans un captage, les eaux peuvent se créer une nouvelle issue, abandonnant définitivement la première.

Les eaux arrivant dans cette fracture étaient chargées de nombreuses substances en dissolution, en particulier beaucoup de sulfate de chaux (1 gramme par litre ; avec un débit de 1.200 litres par seconde, cela représente environ 10.000 m^3 de gypse par an). Il en résulte, au bout de quelques années, des vides énormes, pouvant déterminer des accidents géologiques et de véritables gouffres où les eaux peuvent s'accumuler. Ce phénomène se reproduit sur une échelle moindre pour le carbonate de chaux. L'eau qui s'infiltre rencontre des réservoirs qui jouent le rôle de régulateurs et qui expliquent le régime permanent des sources importantes.

Au Simplon, on a cru que ces venues d'eau ne dureraient qu'un temps ; l'eau a baissé effectivement, parce qu'on avait crevé des poches qui se sont vidées ; mais il s'est établi rapidement un régime nouveau, un peu moindre, mais encore très abondant. On pensait que le champ d'infiltration était minime et que le débit devait être peu considérable ; il fut 7 à 8 fois plus grand. On n'avait pas tenu compte de la grandeur des galeries et des réservoirs qui mettent en relation d'immenses surfaces et peuvent atteindre même certaines rivières. Si le sous-sol est saturé, la rivière ne s'infiltre pas ; si l'on vient à assécher le sous-sol, directement ou indirectement, la rivière s'y infiltre et disparaît (le phénomène est bien connu par l'expérience de certaines mines de calamine, de lignite dans les Bouches-du-Rhône, etc.).

Il arrive constamment dans les travaux de mine de rencontrer des eaux chaudes ou froides. Ainsi à *Boccheggiano* (Toscane), vers 150 à 200 mètres, on a recoupé une venue thermale. De même au Comstock, etc.

De nombreuses observations montrent ainsi, dans une même fracture, des eaux chaudes et froides ayant une pression hydrostatique différente. En établissant une contre-pression égale à celle de la source la plus faible, on l'arrête ; l'autre continue à couler. On peut ainsi modifier la température et la composition d'une source.

La plupart des eaux thermales sont, par suite, avant les travaux de captage, un mélange d'eaux profondes pures avec des eaux superficielles froides, susceptibles d'être contaminées et qu'on peut arrêter en modifiant la pression.

En Bohême, la station thermale de *Teplitz* (fig. 177) est située sur un filon de porphyre à 7 kilomètres de la mine de lignite d'Osseg. Les eaux arrivent à Teplitz par une large fracture se disséminant en une série de petites fissures dans le porphyre. On a pu y descendre jusqu'à 250 mètres. D'autre

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

part, à leur voisinage, se trouvent des argiles à lignite imperméables, superposées à du Crétacé perméable. Des infiltrations thermales se produisent en temps normal dans celui-ci, formant, dans un conglomérat du Cénomanien et un calcaire fissuré du Sénonien (Pläner), des nappes adventives, maintenues en équilibre par une contre-pression d'eau froide. Or, à un moment donné, un travail de mine malheureux vint rompre cet équilibre et produire une mise en communication des mines avec les sources thermales par un réseau souterrain.

Le 10 février 1879, une galerie à la cote 156 fut brusquement envahie par un jet d'eau (10 m³ par seconde). En peu de temps la mine fut inondée sur 60 mètres de hauteur, l'eau s'élevant précisément de la différence de niveau entre la mine et la source ; 21 ouvriers furent tués. Cette eau était

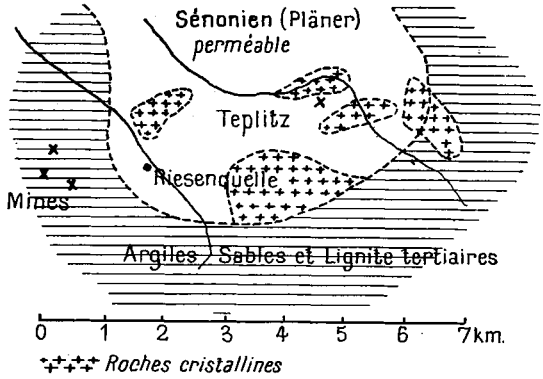


Fig. 177. — Carte géologique schématique de la région de Teplitz (Bohême).

d'abord froide ; c'était de l'eau relativement superficielle, refoulée par la pression de l'eau thermale ; elle est devenue progressivement chaude (21°) par suite du mélange avec celle-ci. Quand l'équilibre a été rétabli, la température a baissé progressivement. En même temps, l'eau thermale dans la source avait disparu. On a alors, à Teplitz, approfondi le captage et, en recreusant les fissures du porphyre, on a trouvé l'eau thermale à une profondeur de 50 mètres. Puis, la saison thermale terminée, on a essayé d'établir un barrage étanche entre la source et la mine ; à cet effet, on a pompé dans la mine et rebétonné toutes les fissures. On est arrivé ainsi à retrouver momentanément l'ancien état de choses.

Mais, au bout de 8 ans, un jet d'eau considérable s'est produit, transportant des blocs de 7 kilogrammes. On a immédiatement rebétonné par en haut le chantier épuisé ; puis on a épuisé la mine. En même temps, on a imaginé de capter la source thermale à Teplitz même, au moyen d'un captage étanche ; on a fait un sondage jusqu'à 500 mètres, mais on n'a réussi qu'incomplètement.

En 1892, la source thermale est retournée à nouveau dans la mine qui, à la suite de difficultés, est restée envahie. En 1895, on a alors établi, vers la Riesenquelle, un grand puits où l'eau montait à une hauteur variable, servant en quelque sorte de manomètre intermédiaire. On a pu

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

ainsi arriver à épuiser progressivement la mine et à établir un barrage qui depuis n'a pas bougé.

On s'est rendu compte que l'on pouvait, par le puits de la Riesenquelle, faire varier la pression dans la source thermale et, en même temps que la pression, l'arrivée d'eau froide et la composition de l'eau.

Tous ces faits ont permis de constater que l'eau circule souterrainement avec des lois très voisines des lois de l'hydrostatique.

Les catastrophes successives ont été, d'ailleurs, de moins en moins importantes, parce que les réservoirs intermédiaires situés dans le niveau de Pläner s'étaient vidés.

III. — Observations indirectes en partant de la surface

Elles peuvent se faire par la fluorescéïne, par les observations de température, par l'analyse chimique. Celle-ci donne souvent des indications sur la nature des terrains traversés (terrains calcaires, pyriteux, salifères, gypseux, etc.). L'analyse bactériologique n'est démonstrative que si elle est répétée. En effet, une analyse faite en dehors d'une période de maladie ne donnera aucun résultat et ne prouvera rien ; de plus, les trajets de circulation des eaux souterraines peuvent se modifier, notamment après une période pluvieuse qui amorce des siphons nouveaux.

4. Parcours des eaux souterraines. — Le parcours des eaux souterraines comprend trois parties :

l'infiltration ;
le circuit souterrain ;
la remontée au jour.

Dans tout ce qui suit, on suppose que les eaux thermales sont surtout d'origine superficielle. On laisse de côté, ici, les eaux qui viennent peut-être directement de la profondeur (eau de fusion des roches ; eaux dites « juvéniles ») ; la partie relative aux infiltrations ne peut s'appliquer à elles.

I. — Infiltrations

L'eau qui arrive sur le sol (pluie) se divise en trois parties : 1° eau d'évaporation ; 2° eau de ruissellement ; 3° eau d'infiltration.

La proportion de ces trois parties est extrêmement variable suivant les cas particuliers.

Ces infiltrations peuvent se faire très lentement. Par elles, un bassin d'alimentation peut être très étendu et beaucoup plus développé qu'on ne le croyait autrefois. Les contaminations sont donc possibles à grandes distances. Les points d'infiltration par masses (abîmes, bétoires, etc.) sont assez rares ; les eaux s'infiltrent plus généralement par un réseau capillaire.

Ce ne sont pas les chutes d'eau rapides et courtes, qui influencent le régime des sources ; c'est la pénétration lente à la faveur des brouillards et des neiges qui est particulièrement importante.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

La nature du réseau capillaire dépend de la constitution du terrain.

Les *terrains granitiques* se décomposent en une arène, véritable sable constituant une sorte d'éponge qui s'imbibe d'eau. Il se produit un niveau d'eau à sa base ; aussi y a-t-il presque toujours des sources au point de courbure du profil des thalwegs, c'est-à-dire au point qui correspond au passage de l'arène au granite non décomposé.

Le *lœss*, limon argilo-sableux, très homogène, parfois très épais (50 à 60 mètres), couvrant de grandes surfaces, permet l'infiltration facile de l'eau. Ainsi, dans la partie danubienne de la Bulgarie, au-dessus d'un calcaire très fissuré, se trouve un feutre de lœss. Dans ce lœss on trouve de l'eau d'une façon très homogène. Chaque puits draine un cône dont le

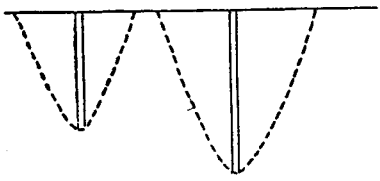


Fig. 178. — Schéma de puits assez éloignés drainant chacun leur région.

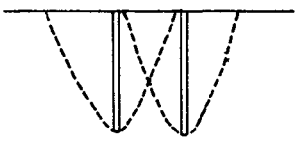


Fig. 179. — Schéma de puits trop rapprochés se nuisant mutuellement.

volume est proportionnel au cube de la hauteur du puits. Il est facile de se rendre compte que des puits trop voisins influent les uns sur les autres.

Les *micaschistes* et *schistes redressés* donnent lieu par leurs strates à des infiltrations faciles, mais très irrégulières.

Le régime d'infiltration devient particulièrement irrégulier quand on a affaire à des *calcaires*. Dans ce cas, c'est toujours sous la forme d'un réseau parallélépipédique que se produisent les infiltrations, réseau constitué par de petites diaclases ou de grandes ouvertures, suivant la nature du calcaire. Quand les bancs de calcaire sont minces et intercalés de marnes, il se produira de véritables petites nappes.

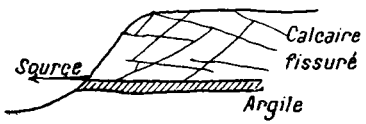


Fig. 180.

Quand la masse de calcaire est considérable et homogène (craie du bassin de Paris), l'eau s'enfonce à de grandes profondeurs, laissant la surface complètement sèche et couverte de thalwegs sans eau. Si elle rencontre une nappe d'argile avant d'arriver au niveau hydrostatique, il se produit accumulation d'eau sur cette couche d'argile et l'eau viendra au jour sur les affleurements des argiles (fig. 180). Sinon, il faudra aller la chercher sous la surface hydrostatique. Quand la craie est fissurée jusqu'au-dessous du niveau hydrostatique, il existe, en effet, à une certaine hauteur, une surface correspondant aux différents niveaux atteints par l'eau dans les fractures individuelles.

Ainsi, dans l'intérieur du plateau de la Dobroudja bulgare, il s'établit une surface de drainage qui correspond au niveau hydrostatique. Mais,

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

comme j'ai déjà eu l'occasion de le dire, il n'est pas certain qu'un puits trouve de l'eau en *a*, à l'intersection de la surface hydrostatique et cette remarque est très importante en pratique. Il pourra n'en trouver que plus profondément en *b*, c'est-à-dire quand il rencontrera une fissure aquifère.

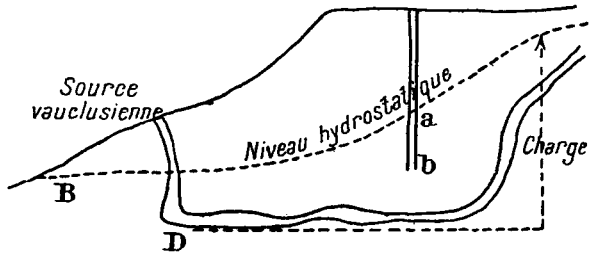


Fig. 181. — Coupe schématique d'une source vauclusienne

Mais l'eau, une fois rencontrée en *b*, remontera jusqu'au niveau *a*. Les cotes de l'eau dans les puits s'établissent donc suivant la surface hydrostatique ; mais les profondeurs des puits eux-mêmes peuvent être très variables.

II. — Circulation des eaux souterraines

L'eau infiltrée, descendue dans le sol, est soumise à une série de forces : gravité, capillarité, charge hydrostatique, conditions de température.

La capillarité n'entre en jeu que dans le cas de fissures très fines ; elle doit jouer un rôle assez faible vis-à-vis des autres forces.

De même, les conditions de température ne jouent probablement qu'un rôle médiocre et ne servent qu'à modifier la répartition des circuits. On a donc principalement en présence la gravité et la pression hydrostatique.

La remontée de ces eaux peut se faire de 4 façons principales :

1° Les eaux reviennent au jour parce qu'elles ont rencontré une couche imperméable (*sources ordinaires*). Elles viennent au jour presque sans charge ; leur bassin d'alimentation est peu étendu et situé à une faible profondeur ; elles ont un débit restreint ; ces eaux ne sont pas chaudes et sont à peine minéralisées ;

2° Les eaux remontent par une fissure communiquant avec un bassin d'alimentation relativement étendu, situé à une profondeur également assez faible ; ce sont les *sources pérennes* ou *isothermes*, généralement assez abondantes et qui gardent la température moyenne du lieu. Cette température constante peut être par exemple de 12° même en hiver (Les fonts bouillants). Ces eaux ne constituent pas des sources thermales ;

3° L'arrivée se fait par un chenal très large, permettant le drainage de parties telles que D (fig. 181), situées quelque peu au-dessous du niveau hydrostatique, avec une pression ou charge assez considérable (*sources vauclusiennes*, *résurgences* dans les vallées des Causses).

4° *Sources thermales*. Dans certains cas, l'infiltration des eaux peut se faire par cheminement lent jusqu'à 2.000 et 3.000 mètres. Pendant ce trajet, l'eau s'échauffe considérablement (100°, si elle est descendue à

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

plus de 3.000 mètres). De la profondeur, cette eau remonte rapidement par des cheminées ascensionnelles qui sont des failles, des filons, etc. Pour qu'il y ait source thermale, il faut donc une large *fracture* continue, analogue aux fractures filoniennes et constituant une sorte de tuyau étanche, allant puiser à grande profondeur dans le réservoir hydrostatique sous pression.

Toutes les fois que les travaux d'une source thermale permettent de descendre à une profondeur suffisante et d'atteindre le « griffon » en roche, on constate l'existence de cette fracture. Ainsi, à Teplitz, on est descendu jusqu'à 250 mètres dans la fracture. Mais, à la surface, l'eau thermale peut quitter la fracture originelle et se disperser.

J'insiste donc sur ce point fondamental, que *ce qui caractérise une source thermale, c'est, après l'infiltration lente permettant aux eaux de s'échauffer en descendant dans le sol, la remontée rapide qui ne permet pas le refroidissement.*

On peut calculer le temps de la remontée en fonction du débit, donc de la vitesse, et de la température, donc de la profondeur d'où vient la source.

Le débit Q d'une source quelconque de section w et de vitesse d'écoulement v s'écrit en effet par définition même : $Q = wv$.

Comme on connaît le débit Q (par exemple 1.000 litres, soit 10 cm^3 par seconde), la section W (par exemple 10 m. $\times$ 0 m. 10, soit 10^4 cm^2), on déduit la vitesse

$$v = \frac{Q}{w} = \frac{10^6}{10^4} = 10^2 \text{ cm.}$$

par seconde, ou 1 mètre par seconde.

On connaît, d'autre part, la profondeur approximative du réservoir souterrain, fonction de la température de la source. Ainsi, dans un lieu à température moyenne de 10°, à degré géothermique de 30 mètres, une source ayant une température de 60° viendra d'une profondeur de $50 \times 30 = 1.500$ mètres.

Sa vitesse étant de 1 mètre par seconde, elle a dû mettre environ 1.500 secondes, soit 25 minutes pour remonter.

Cette durée de remontée est très variable ; elle peut atteindre plusieurs jours. Ainsi, avec un débit de 10 litres par seconde, on trouverait une durée de remontée 100 fois plus grande (41 heures et 40 minutes).

Il faut noter que, dans l'ensemble, les sources thermales ont un débit (1) relativement constant : ce qui implique de grands réservoirs souterrains. L'eau contribue, d'ailleurs, à les créer ; elle dissout, en effet, les éléments de leurs parois d'autant plus facilement qu'elle est à température plus élevée (d'où sa minéralisation). La minéralisation des sources est peu

(1) **Pour augmenter le débit d'une source thermale, il suffit de la puiser en profondeur. On diminue ainsi le trajet, la charge à la remontée et on augmente la vitesse. Dans cet approfondissement on peut rencontrer des venues d'eaux étrangères. Pour s'en rendre compte, il suffit de recourir à l'analyse, ou simplement d'établir une courbe du débit en fonction de la profondeur. De telles courbes sont toujours très instructives et devraient être établies toutes les fois que l'on fait un pompage sur une source thermale.**

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

importante ; mais, avec le débit et le temps, l'eau arrive à enlever des masses considérables de matières. Les réservoirs des eaux thermales doivent donc s'augmenter constamment.

D'autre part, il y a un rapport entre le débit des sources thermales et les conditions météorologiques de la région ; les variations du débit sont corrélatives des variations de la pluviosité, mais avec un retard de quelques semaines, parfois de plusieurs mois. Ce retard exprime le temps même nécessaire à la descente en profondeur des eaux d'infiltrations.

III. — Retour des sources thermales a la surface

Ces sources se trouvent d'abord : A) *sur une fracture géologique.* Mais ces fractures géologiques sont plus ou moins continues en plan ; sur la longueur de la fracture, les sources sont localisées ; B) en un point de *moindre pression topographique* (vallée, bord de la mer, etc.)

A) **Fractures géologiques.** Les sources thermales se trouvent toutes *dans les régions de dislocations récentes* (les régions de dislocations anciennes ont leurs sources obturées par les éboulis de la surface et par les dépôts de la source même). Ainsi, en Europe, on n'en connaît pas en Norvège, en Finlande, dans le Nord de l'Angleterre, régions de dislocations anciennes (ce n'est pas une question de latitude, car il y a de nombreuses sources thermales en Islande où l'on retrouve des fissures d'origine récente). De même, en France : en Bretagne, Ardennes, il y a peu de dislocations récentes, donc de sources thermales proprement dites. Elles abondent, au contraire, sur les cassures tertiaires du Plateau Central, dans les Pyrénées et les Alpes.

Commençons par donner *des exemples de fractures* : *a*) failles, et *b*) filons... Nous passerons ensuite aux dépressions topographiques.

a) Failles. Sur le bord du *Forez*, le système des failles produit une dénivellation d'au moins 2.000 mètres ; elles sont disposées en échelons et produisent un contact hétérogène entre le Primaire et le Tertiaire, grâce auquel se trouvent alimentées les sources thermales. On voit très nettement ces sources s'aligner sur les grandes fractures (fig. 182).

De même en *Limagne*, dans la *Nièvre*, dans le *Bourbonnais*. (A *Chatelguyon* la fracture n'apparaît pas en surface).

A *La Bourboule* (fig. 183) les eaux remontent le long de la fracture F (Plan de faille très visible derrière l'établissement thermal). Pour les rechercher, on fait des puits qui vont recouper la fracture ; il suffit, d'ailleurs, de rencontrer de l'eau dans l'une des fractures adventives. On offre à l'eau un chemin plus court et largement ouvert, au lieu du chemin plus long qu'elle suit normalement. Au bout d'un certain temps, le tuyau s'obstrue et s'encrasse. L'eau tend à reprendre son ancien chemin, à moins que l'on ne fasse un nouveau sondage.

b) Filons. Les faits sont analogues à *Bourbon-l'Archambault* (Allier) (fig. 184). Un massif de gneiss y est complètement entouré par du Permien. Une série de cassures y constituent de véritables filons métallifères (avec galène, blende, fluorine, quartz, strontiane). L'une de ces cassures s'est rouverte à une époque récente et a donné lieu à la source thermale. La

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

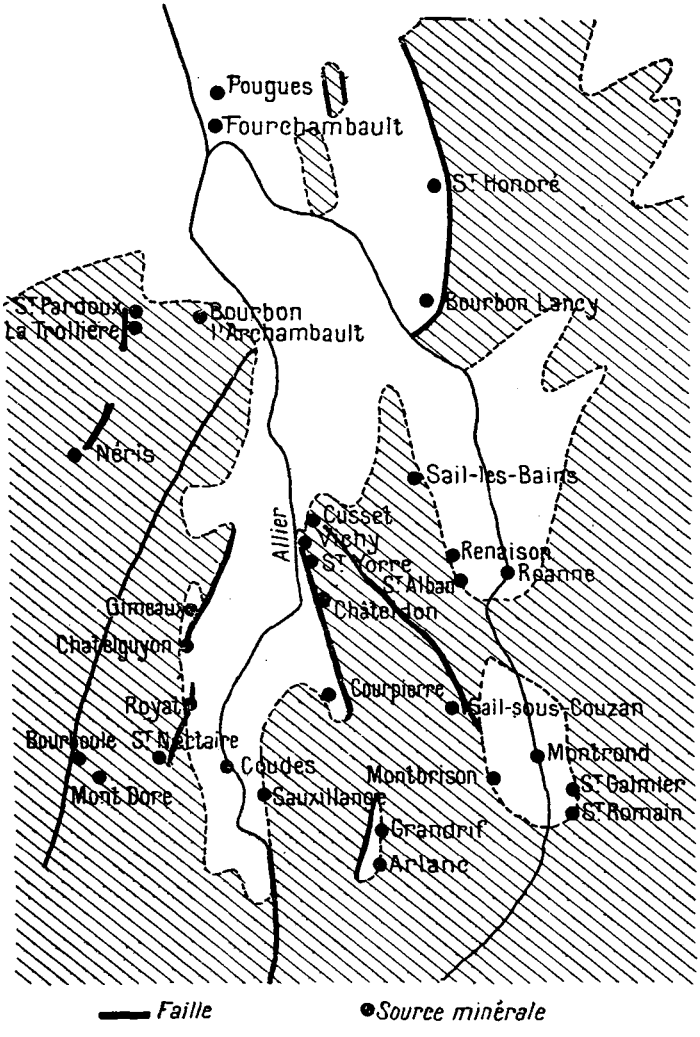


Fig. 182. — Carte schématique des cassures et des sources thermales du Centre de la France (1).

(1) Montrond (Loire) est une source artificielle : un forage a été atteindre profondément la nappe artésienne.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

source thermale est localisée en un point déterminé, unique, correspondant à la vallée, au point le plus bas où la résistance est la moindre.

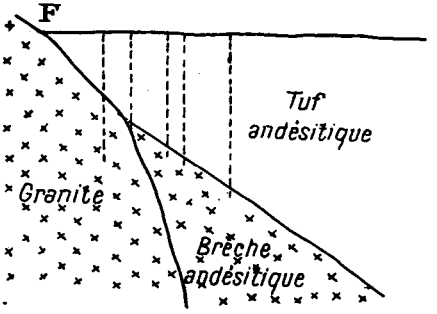


Fig. 183. — Coupe géologique schématique à la Bourboule (Puy-de-Dôme).

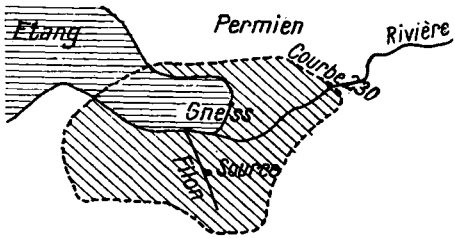


Fig. 184. — Carte schématique de Bourbon-l'Archambault (Allier).

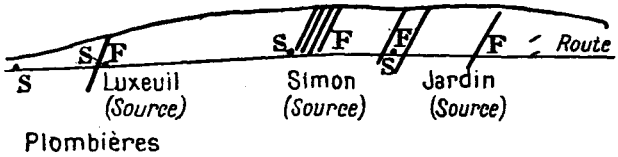


Fig. 185. — Schéma de la relation des sources avec des filons métallisés F.

A *Plombières* (Vosges), les relations sont également les mêmes (Sources S sur des filons de quartz et de fluorine au milieu du granite) (fig. 185).

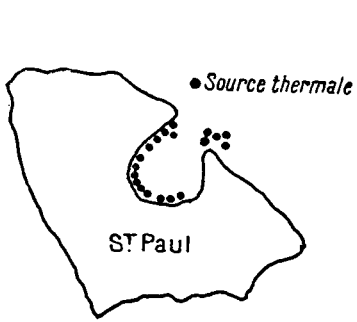


Fig. 186.

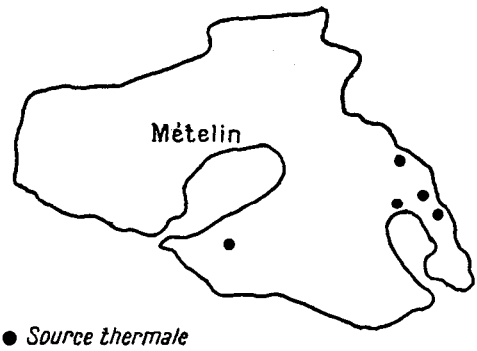


Fig. 187.

Schéma de la disposition des sources thermales sur le bord de la mer à l'île Saint-Paul (O. Indien) et à Metelin (Archipel).

A *Saint-Nectaire* (Puy-de-Dôme), la source se trouve sur un filon de quartz, fluorine, barytine, réalgar.

A *Evaux*, elle est de même sur un filon de quartz.

c) Plis brusques. Un pli brusque, qui ramène verticalement au jour une strate poreuse, peut également produire l'effet que l'on obtient artificiellement par un sondage artésien.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

B) Exemples de dépressions topographiques. Les sources thermales sortent toutes en des points bas, dans des dépressions où la charge est moindre. La conséquence est qu'un grand nombre de sources se trouvent près de la mer ; le fait est le même et très net, pour les eaux froides. Dans les pays à calcaires fissurés, des sources vauclusiennes se font jour dans la mer même.

Sur tout le parcours du cratère de l'île Saint-Paul (Océan Indien) (fig. 186), il y a une ceinture de sources thermales, presque continue sur le bord de la mer. Il en est de même dans l'île d'Ischia, dans l'île de Metelin (Archipel) (fig. 187).

Il arrive aussi que les eaux sortent dans le lit même des rivières, dans des alluvions où la recherche et les travaux sont particulièrement difficiles.

Les sources se trouvent souvent aussi au pied des montagnes, à l'intersection des filons avec la vallée (Bagnères-de-Luchon).

Les sources de Ragaz (Suisse) sortent de même à l'intersection d'une vallée profonde et de filons perpendiculaires.

Les dépressions de ce genre sont presque toujours comblées d'éboulis tombés de la montagne où la source se perd.

5. Propriétés des sources thermo-minérales. — Les sources thermo-minérales sont, tantôt chaudes, tantôt minéralisées. Elles sont définies, comme je l'ai dit, par l'usage qu'on en fait en médecine ; mais elles sont généralement caractérisées, en même temps, par leurs propriétés physiques et chimiques. Les unes sont simplement thermales et très pures ; les autres sont à la température ordinaire et très chargées en matières minérales ; beaucoup possèdent les deux qualités à la fois.

a) La *thermalité* tient uniquement à la profondeur d'où vient l'eau (en gros : 1° tous les 30 mètres, donc 33° tous les 1.000 mètres). Dans les pays volcaniques, le degré géothermique n'est quelquefois que de 8 à 10 mètres ; la température croît très vite avec la profondeur ; le pays est alors en outre très disloqué et on y rencontre de nombreuses sources thermales minéralisées.

b) La *minéralisation* s'explique par la nature des terrains traversés.

Classification des sources thermo-minérales

A ce point de vue on peut distinguer :

1° Des *sources salines* : ce sont les eaux qui doivent leur minéralisation à une simple dissolution des sels contenus dans les terrains traversés, sans qu'il y ait eu décomposition des minéraux par un agent chimique quelconque, sans que ni la thermalité, ni l'acide carbonique aient eu besoin d'intervenir. Ces eaux renferment tous les éléments banals solubles à la température ordinaire (chaux, chlorure de sodium, pyrite, sulfate de chaux, sels de magnésie). Telles sont :

Les eaux sulfatées calciques ou sodiques qui arrivent à la surface avec leur composition profonde, sans grand intérêt ;

Les eaux sulfurées calciques ou sodiques qui ont subi, au voisinage de

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

la surface, des réductions, grâce à la présence de matières organiques ou de bactéries, et qui contiennent des sulfures libres. Ces eaux présentent un certain intérêt (Enghien).

2° Des *sources carbonatées* : elles sont caractérisées par la présence de CO^2 libre dont l'abondance est directement liée aux manifestations volcaniques. Ce sont des sources de régions volcaniques tertiaires ou récentes. La présence de CO^2 permet la dissolution facile de CO^3 Ca à l'état de bicarbonate. En surface, ces eaux produisent des incrustations de CO^3Ca dues à la précipitation du carbonate, lors du départ de CO^2. Ces eaux contiennent des carbonates alcalins et de la silice, quand elles sont chaudes ou qu'elles ont été chaudes (Vals ; Vichy ; Plombières ; Royat ; La Bourboule ; Saint-Galmier).

3° Des *sources sulfurées sodiques* : ce sont des sources alcalines, comme celles à chlorure de sodium ou à carbonate de soude. Mais ce sont des sources à forte thermalité qu'on rencontre dans des régions où les roches sodiques dominent.

L'alcalinité est due à du silicate et à du carbonate de soude. La sulfuration, provenant de la rencontre de pyrites, est le caractère le plus frappant de ce genre de sources. Elle est due à la présence d'un principe sulfuré (peut-être Na^2S) qui donne par décomposition de l'hydrogène sulfuré libre. En outre, des éléments organiques gélatineux (barégine, luchonine) semblent jouer un rôle dans cette sulfuration.

Ces sources sont des types de montagnes qu'on rencontre surtout dans les Pyrénées (Cauterets, Luchon), quelquefois dans les Alpes (Aix-les-Bains).

Toutes ces eaux sont faiblement minéralisées et renferment une petite proportion de silice.

4° Des *sources alpestres ou indifférentes* : ce sont des sources à très haute température, à débit abondant, très pures (leur minéralisation est à peu près nulle et, en tout cas, quelconque). On les rencontre dans les régions de roches cristallines et de terrains métamorphiques non solubles, ayant été soumises à des dislocations nettes et récentes et offrant à la circulation rapide des eaux de longs circuits profonds (Ragaz, Plombières, Gastein). Ces eaux ont une action thérapeutique peut-être due à l'influence des éléments chimiques dilués ou d'éléments radioactifs auxquels on attache aujourd'hui une grande importance.

Dans les eaux thermo-minérales, on peut rencontrer, en outre, de l'arsenic, du mercure, de l'antimoine, du lithium, de la baryte. Il s'y trouve aussi des gaz dont certains viennent de l'air (CO^2) ; l'azote et les gaz inertes s'y rencontrent toujours en même proportion.

Les eaux thermo-minérales agissent sur les terrains qu'elles traversent de deux manières :

a) Incrustation (dépôts de carbonates, sulfates, fluorine, etc. Ces dépôts peuvent obstruer les conduits de la source et produire son déplacement) ;

b) Réactions chimiques lentes (Les minéralisations de Plombières).

6. Captage des eaux souterraines. — Les procédés qui vont être exposés ici s'appliquent plus spécialement aux eaux thermales ; mais ils

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

peuvent être utilisés pour les eaux ordinaires, d'ailleurs plus faciles à capter. Ils comprennent :

1° La recherche de l'eau thermale ;

2° Le captage proprement dit ;

3° L'aménagement des eaux thermales (adduction au réservoir, à l'établissement thermal, aux baignoires, piscines, etc.),

Capter une source thermale, c'est employer les dispositifs propres à lui assurer le maximum de thermalité et de débit et à empêcher le mélange avec les eaux ordinaires qui abaissent sa température et y ajoutent des impuretés.

On ne doit pas augmenter le débit en diminuant la thermalité et la minéralisation. Cela revient à la laisser se mélanger avec des eaux ordinaires, avec des infiltrations superficielles : ce qui a de gros inconvénients, car les eaux superficielles peuvent contaminer les eaux thermales. Cette prescription n'est pas toujours observée ; les captages sont rarement complets à ce point de vue et l'eau n'a pas toujours la pureté qu'elle devrait avoir. La difficulté est, d'ailleurs, grande dans beaucoup de cas.

Il y a parfois là un problème délicat à résoudre ; car les eaux thermales doivent souvent une partie de leurs propriétés à des mélanges de cette nature : ainsi il y a des eaux sulfatées calciques qui, en présence de matières organiques (lignites), se chargent en hydrogène sulfuré et en acquièrent leurs propriétés. Par conséquent, si on faisait le captage trop parfait en profondeur, on aurait une eau à minéralisation différente de celle que l'on recherche. Dans des cas de ce genre, il faut donc se contenter d'examiner ces eaux superficielles au point de vue de la contamination bactériologique.

Quels que soient les cas particuliers, les premiers principes à appliquer sont :

I. Se rendre compte des conditions dans lesquelles se présente la source et établir un *plan de captage*. Par suite, il faut déterminer la position de la fracture qui n'apparaît pas toujours en surface, reconnaître son intersection avec la surface topographique et choisir le point de sortie qui est le plus favorable ; car on a souvent plusieurs griffons qui se dispersent le long de la fracture ou le long des fractures superficielles secondaires. Les questions de propriétés du sol entraînent souvent une complication.

II. Etablir un *niveau de captage*. Faute de ce soin, si on a plusieurs émergences, on peut créer des pressions réciproques qui agissent sur les différentes eaux et modifient leur répartition (1). Pour attirer une source thermale, il suffit parfois de créer une dépression là où on veut l'avoir et d'établir une surpression ailleurs.

Le **captage** consiste en puits, galeries, travaux souterrains. On se trouve en présence de deux problèmes (épuisement des eaux, ventilation) assez analogues à ceux des travaux des mines. Cependant, il y a des différences spéciales.

L'*épuisement* des eaux se fait ici, au moyen de machines de rencontre ; il détermine peu à peu la baisse du niveau de la source thermale ; la quan-

(1) Ainsi vers 1850, à *Bagnères-de-Luchon*, les sources sortaient de plusieurs filons de granulite ; on a fait des galeries à des niveaux quelconques ; il s'est exercé des pressions des eaux d'une galerie sur celles d'une autre ; les eaux froides se sont mélangées aux eaux chaudes.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

tité d'eau débitée peut alors augmenter notablement à cause de l'augmentation de la pression hydrostatique en profondeur et causer des difficultés imprévues.

L'*aération* est également difficile ; beaucoup de sources sont gazeuses. Après épuisement de l'eau, il y a une nappe de gaz (acide carbonique à Vichy, etc.). Il faut s'en débarrasser ; les moyens dont on dispose sur place ne sont généralement pas puissants. On ventile, ou bien on est parfois amené à établir un circuit au moyen d'une galerie et d'un sondage parallèle.

GARNISSAGE. — Les galeries de recherches d'eau ne peuvent pas rester boisées. Il faut les cimenter avec soin, au moyen de maçonneries étanches, de façon à éviter les fissures par lesquelles les eaux pourraient s'échapper. Les tuyaux métalliques dont on a à se servir sont attaqués plus ou moins vite par les substances salines dissoutes dans les eaux thermales (on a trouvé des cristallisations de chalcopyrite, cuprite, galène, sur des monnaies romaines ou des objets tombés dans les sources de Plombières, Néris, Bourbonne, etc.).

Cette altération est particulièrement rapide pour le fer ; il vaudrait mieux utiliser du grès émaillé ou du cuivre ; en pratique on se sert de fer ; mais il ne faut pas oublier qu'on devra remplacer les parties métalliques assez rapidement et se réserver la possibilité d'aller les changer en profondeur.

MÉTHODE DE CAPTAGE. — Elle est très analogue, dans son principe général, à l'exploitation d'un minerai. On se propose d'aller chercher l'eau dans son gisement naturel, comme on va chercher un minerai. Il y a cependant certaines différences.

Les unes sont défavorables. Un captage de sources se fait dans de l'eau, souvent chaude, et dans du gaz, dont la quantité augmente très vite avec la profondeur.

Les autres sont favorables ; on est obligé d'aller chercher le minerai là où il est (sauf le pétrole et le soufre en Louisiane) ; au contraire, on peut forcer l'eau à venir à l'endroit choisi, au moyen de pressions convenablement réalisées. Il y a donc de ce chef deux cas principaux et deux modes généraux de captage.

Les méthodes employées pour aller chercher les eaux thermales dépendent des conditions de l'émergence :

1° Sources thermales provenant d'une grande fissure ;

2° Sources thermales interstratifiées, provenant d'une nappe artésienne (Vichy, Saint-Yorre, Vals, etc.).

Quand l'eau provient d'une fracture nette, il peut, en outre, se présenter deux cas :

a) Le griffon se trouve dans une roche compacte, venant jusqu'à une faible distance de la surface, et on peut atteindre directement ce griffon au moyen de travaux peu importants ;

b) Le griffon, en roche compacte, est recouvert sur une épaisseur assez considérable par des alluvions, des éboulis ; il est difficile d'atteindre ce griffon en roche (Dans ce cas, on est amené à faire intervenir les pressions hydrostatiques.)

Nous allons examiner successivement ces divers cas.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

I. — Captage des eaux thermales provenant d'une fracture a griffon accessible

A) **Eaux non gazeuses.** — On peut faire un puits qui recoupe le filon, ou aller à sa rencontre au moyen de galeries horizontales.

A *Maizières* (Commune de Magnieu, Côte-d'Or), source jadis captée par les Romains, il y a un massif de microgranulite encaissé dans les tufs porphyriques du Culm (fig. 188 à 189).

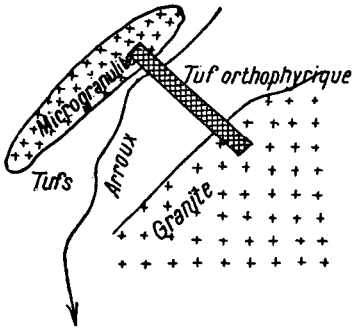


Fig. 188. — Croquis montrant la situation géologique de la source de Maizières (Côte-d'Or).

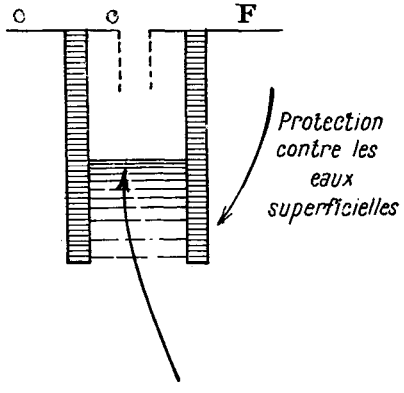


Fig. 189. — Schéma du captage de Maizières.

Dans cette microgranulite, il existe une fracture avec porphyre à quartz globulaire, le long de laquelle remonte une source thermale, avec proportion notable de sodium et de lithium provenant des granites alcalins de la région. Cette fracture est à une très faible profondeur ; le travail romain, repris de nos jours, a consisté à faire un puits ; on a entaillé la fracture ; on a cimenté et fait une cuve remontant jusqu'au jour et empêchant la communication des eaux superficielles avec les eaux profondes (fig. 189).

La source de *Bourbon-l'Archambault* (Allier) se trouve dans un massif de gneiss, entouré et recouvert par du Permien imperméable (fig. 184), qui empêche les eaux du gneiss de s'échapper. Ce massif de gneiss est traversé par de petites fractures filoniennes avec barytine, célestine, fluorine, galène. Un filon N.-W. /S.-E. est encaissé dans le gneiss ; dans le point le plus bas, on a plusieurs sorties de sources thermales. Le travail des Romains a consisté à bétonner toute la fissure en pénétrant jusqu'au point où le gneiss est intact (5 à 6 mètres), de façon à empêcher tout contact avec les eaux superficielles. D'ailleurs l'eau chaude arrive avec une pression hydrostatique considérable et chasse l'eau froide. Des travaux supplémentaires, inutiles (H,a',a'', fig. 191), ont été exécutés sous Louis XIII ; au-dessus de chacune des émergences, on a fait alors 3 cuves, comme sus-

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

pendues au-dessus des griffons pour constituer des sortes de cheminées de captage.

On a construit une cheminée superficielle (fig. 192), de façon à faire un réservoir avec un plan de captage élevé. Mais l'eau se trouve en charge et on réduit le débit. Quand on veut augmenter le débit, il faut, au contraire, abaisser le niveau de captage.

La source d'*Evaux* (Creuse) se trouve le long du grand filon de quartz du Massif Central (60 kilomètres de long) qui draine une grande quantité des eaux souterraines. La vallée, où sort la source d'Evaux et qui la détermine, continue à descendre vers l'aval ; aussi les eaux thermales auraient

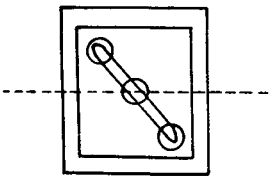


Fig. 190. — Schéma du captage de Bourbon-l'Archambault (plan).

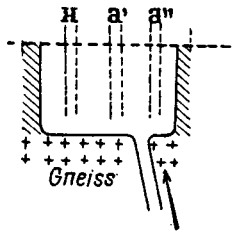


Fig. 191. — Schéma du captage de Bourbon-l'Archambault (profil).

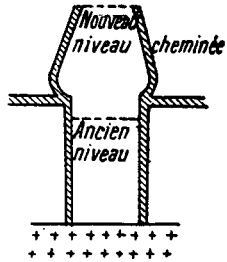


Fig. 192. — Dispositif utilisé à Bourbon-l'Archambault.

une tendance à descendre, à se déplacer dans cette vallée. Les Romains ont fait une sorte de barrage dans les alluvions de la vallée, encaissant ainsi complètement la source. De plus, pour éviter le mélange avec les eaux

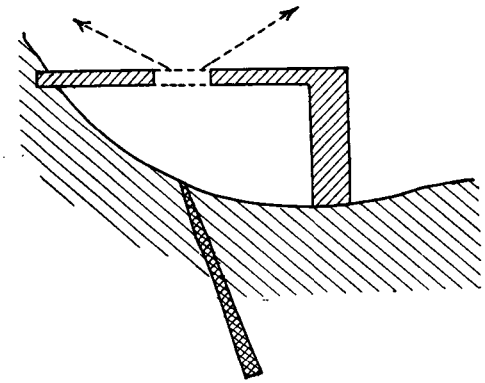


Fig. 193. — Schéma du captage d'Evaux (Creuse).

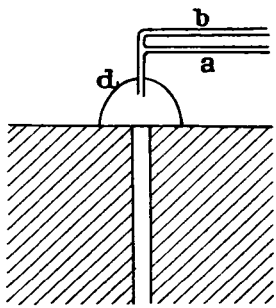


Fig. 194. — Schéma des dispositifs employés à Chatelguyon.

froides superficielles, on a recouvert le terrain d'une nappe de béton ne laissant qu'un nombre restreint d'orifices (fig. 193).

On a commis là autrefois une erreur semblable à celle que nous signalions tout à l'heure à Bourbon-l'Archambault.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

B) **Eaux gazeuses.** — Le problème est plus délicat quand il s'agit d'eaux gazeuses.

A *Chatelguyon*, des failles mettent en contact le granite avec les terrains tertiaires. Des eaux thermales sortent par les fissures qui traversent le granite.

La présence des gaz cause de grosses difficultés ; en effet, le gaz peut s'accumuler et donner de grosses pressions momentanées (coup de bélier) qui brisent les tuyauteries.

Pour y obvier on avait coiffé d'une coiffe en plomb, l'émergence de la fissure (fig. 194, *d*). Les résultats ont été mauvais. On a alors établi une double tuyauterie, l'une inférieure *a* servant au passage de l'eau, l'autre supérieure *b* éliminant les gaz. Ces deux conduites se rendent au réservoir où se fait le mélange à nouveau ; ainsi on évite les coups de bélier.

II. — Captage des eaux thermales provenant d'une fracture a griffon difficilement accessible

A) **Enceintes successives.** — Dans certains cas où les terrains sont très fissurés, on a dû faire une série d'enceintes successives ayant pour but d'arrêter sur toute la périphérie les eaux d'infiltration (fig. 195). On se contente quelquefois d'enceintes partielles dans les parties de la périphérie où l'infiltration est maxima.

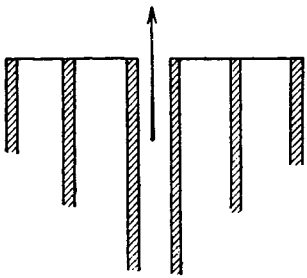


Fig. 195. — Schéma d'une série d'enceintes circulaires de protection dans le Gard.

B) **Puits, Sondages et Galeries.** — Au lieu de puits et de sondages, on peut faire des travaux horizontaux, des galeries qui peuvent partir suivant l'allongement du filon ou, au contraire, aller le recouper perpendiculairement.

La source de *Ragaz* ou de *Pfœfers* (Suisse) sort au fond de la gorge de la Tamina. Elle s'y disperse en une série de sources, l'une importante et permanente, les autres éphémères et variables suivant le débit et la pression hydrostatique (fig. 196). On a fait une galerie G recoupant la fissure ; elle a fourni à l'eau une issue plus facile et a épuisé la plupart des sources secondaires. Cependant une partie de l'eau continuait à s'échapper par le lit du torrent. On a alors relevé l'eau du torrent au moyen d'un barrage ; on a augmenté ainsi la pression de l'eau thermale et elle est passée entièrement par la galerie.

C) **Pressions hydrostatiques.** — On est très souvent amené à se servir ainsi des *pressions hydrostatiques*. On a supposé précédemment qu'on pouvait atteindre les sources en place ; mais un grand nombre de sources thermales sortent dans des terrains d'alluvions assez épais, en utilisant une série de fissures souvent très nombreuses.

Dans certaines eaux de Suisse, telles que Lavey, on a essayé de capter séparément les venues froides et les venues chaudes. Dans un puits de 15 à

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

20 mètres, on a mis plusieurs tuyaux et des pompes distinctes ; les résultats ont été médiocres.

La méthode des pressions hydrostatiques, dont les premières observa-

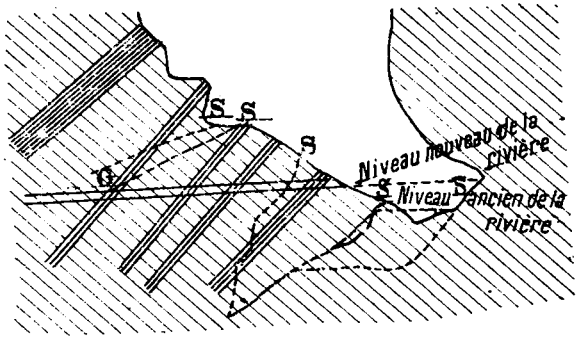


Fig. 196. — Schéma des fissures thermales et des travaux à Ragaz (Suisse).

tions voulues et combinées sont dues à François de Neufchâteau, est fondée sur ce fait que deux liquides, mis en contact dans un tuyau courbe, ne se mélangent pas si on n'exerce pas un effort pour déterminer le brassage et exercent, au contraire, l'un sur l'autre, une pression qui les met en équi-

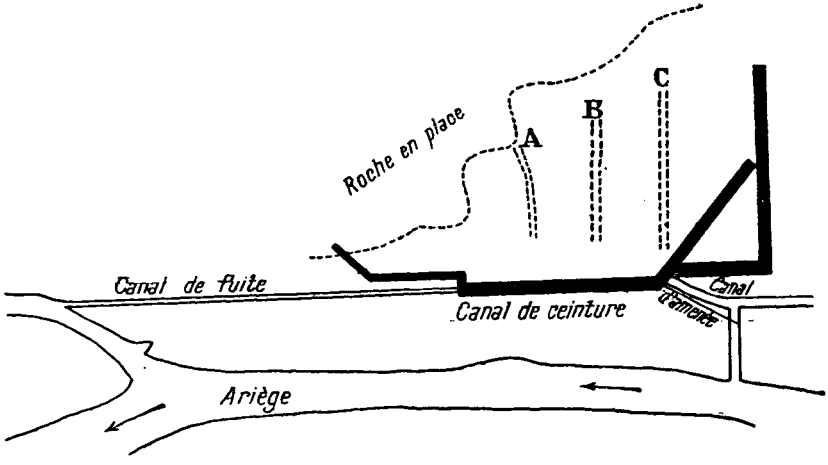


Fig. 197. — Plan schématique du captage et la ceinture hydrostatique des eaux d'Ussat (Ariège).

libre d'après leur densité. On peut donc, au moyen de l'eau froide, obstruer les fissures par lesquelles tendrait à s'échapper l'eau thermale, beaucoup mieux et plus complètement qu'avec un béton. Mais il faut naturellement que la pression de l'eau froide soit rigoureusement calculée pour ne pas amener sa pénétration dans l'eau chaude.

Dans l'Ariège, aux sources d'*Ussat*, en 1838, l'eau sortait dans le lit

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

de la rivière. Quand le fleuve s'élevait, l'eau froide envahissait les fissures d'eaux thermales ; quand le fleuve s'abaissait, les eaux thermales s'échappaient dans le lit du fleuve.

L'ingénieur François de Neufchâteau eut alors l'idée d'employer l'eau froide à faire une ceinture hydrostatique consistant en un canal, rempli par de l'eau froide venant de l'Ariège ; on peut relever à volonté la hauteur de celle-ci de façon à exercer des charges suffisantes pour qu'aucune portion de l'eau thermale captée en A, B, C (fig. 197 et 198) ne puisse s'échapper

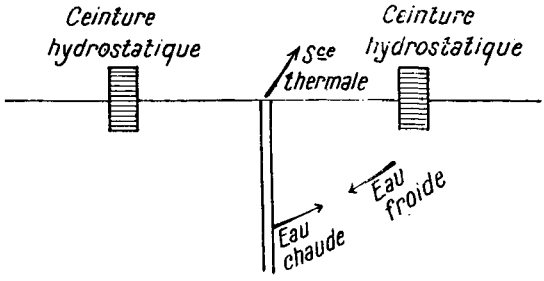


Fig. 198. — Coupe schématique de la ceinture hydrostatique à Ussat.

en dehors de la fissure et pour que l'eau froide ne puisse pénétrer dans la source. Il y a un état d'équilibre piézométrique à étudier d'abord, puis à établir scientifiquement.

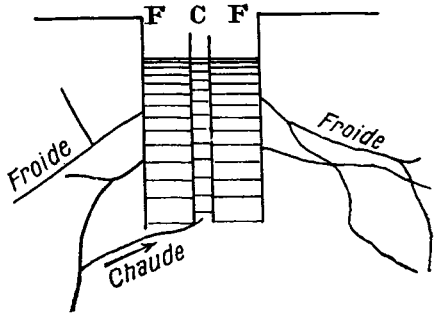


Fig. 199. — Schéma de la disposition adoptée à Cestona (Espagne).

A *Cestona* (Biscaye, Espagne), il y a une série de fissures, avec venues d'eaux chaudes et d'eaux froides. Pour éviter leur mélange, on a essayé de faire une série d'enceintes qui furent absolument inutiles. On a creusé alors une grande cuve à double paroi (fig. 199). En accumulant de l'eau froide dans la partie extérieure F, on exerce une charge telle que toute l'eau chaude sort par le tuyau central C. On peut constater qu'aucun mélange des deux sortes d'eaux ne se produit ; des expériences à la fluorescéine le montrent avec évidence.

A *Bagnères-de-Luchon* (fig, 200), on a un terrain schisteux, très fissuré, avec veines de granulites. Les eaux venant de ces veines se dispersent dans

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

les éboulis en une série de petites sources. On a reconnu d'abord un certain nombre de points d'émergence S, S', S'', plus importants. Des galeries faites à un niveau quelconque ont été recouper les fissures aquifères ; elles se sont nui l'une à l'autre. On les a reprises au même niveau ; on est arrivé au schiste intact et on a fait une galerie d'allongement G qui a recoupé

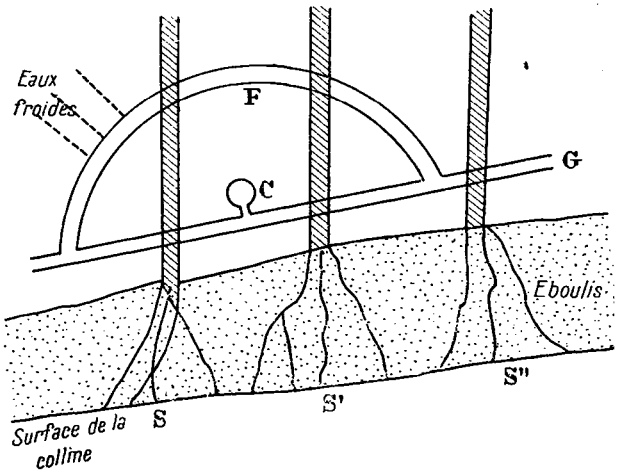


Fig. 200. — Schéma des travaux à Bagnères-de-Luchon (Haute-Garonne).

les différentes veines granulitiques, le long desquelles sont drainées les sources thermales.

On a été amené ainsi à constituer un réseau de galeries de plusieurs kilomètres. Il restait un point délicat où, dans un terrain très fissuré, les eaux chaudes étaient mélangées d'eaux froides, sans qu'on pût réussir à isoler de véritables griffons. On a fait alors une enceinte circulaire double, l'une intérieure C pour l'eau thermale, l'autre extérieure F pour l'eau froide. Celle-ci, dont le niveau est réglé par des vannes, exerce sa pression sur l'eau thermale et la force à arriver en une seule venue en C au centre de l'hémicycle.

La même méthode des pressions hydrostatiques s'est trouvée employée instinctivement à *Bourbon-l'Archambault*, à *Enghien*, à *Pfaefers*. Ses applications, qui provoquent d'abord une certaine inquiétude, deviennent de plus en plus nombreuses.

III. — Captage des eaux thermales interstratifiées appartenant a une nappe artésienne

Quand il s'agit d'aller recouper une nappe d'eau thermale, interstratifiée dans les terrains, il suffit de faire un forage comme pour aller chercher une nappe artésienne ordinaire.

Le cas le plus typique est celui du bassin de *Vichy-Saint-Yorre*. Normalement l'eau, venant d'une faille qui met en contact le Tertiaire avec les tufs du Culm, se disperse dans les strates sableuses du Tertiaire. Le captage artificiel se fait par sondages tubés, de profondeur généralement assez

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

faible. La seule difficulté consiste à éviter par le tubage les mélanges d'eau froide et d'eau chaude. De plus, il faut régulariser l'échappement du gaz pour éviter des coups de bélier. On dispose alors un petit tube central (tube siphoïde), descendant peu profondément et destiné à permettre l'évacuation régulière de l'acide carbonique. Dans d'autres sources, au contraire, on dispose une cloche qui se remplit de gaz ; lorsque cette cloche est pleine, le gaz chasse l'eau au dehors ; on a alors le spectacle d'une source intermittente.

7. Aménagement des eaux thermales. — Il y a, à cet égard, une série de travaux qui ressortent de l'art de l'architecte et que nous n'avons pas à examiner. Dans certains cas, il faut réchauffer l'eau ; dans d'autres, il faut la refroidir : ce qui est parfois plus difficile. Il faut amener l'eau sous pression pour le service des bains et douches, etc.

L'embouteillage de l'eau, le captage des gaz sont également des opérations délicates.

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

TABLE DES MATIÈRES

NOTIONS PRÉLIMINAIRES 1
Objet de la Géologie appliquée 1
La notion de minerai 1
Relativité de cette notion 2
Les concentrations anormales 3
La valeur d'un gisement 3
Prises d'essai 3
Prospection d'une mine nouvelle 4
Divisions du cours 5

PREMIÈRE PARTIE

GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE PREMIER

RÉPARTITION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES DANS L'ÉCORCE TERRESTRE

1. *Composition moyenne de l'écorce terrestre* 7
2. *Distribution primitive des éléments* 8
Atmosphère 9
Eaux et organismes 9
Ecorce silicatée 9
Zone profonde 9
3. *Les premières concentrations métallifères de la phase cosmique* 10
4. *Les phénomènes géologiques et les types de gisements* 11

CHAPITRE II

PHÉNOMÈNES ACTUELS POUVANT SERVIR A EXPLIQUER LA FORMATION DES GITES MÉTALLIFÈRES

A. — Phénomènes réalisés à haute température 14
1. *Volcans* 14
Fumerolles 15

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

2. *Eaux thermales* 16
a) Sources ordinaires 17
Surface hydrostatique 17
Eaux actives et eaux inertes 17
b) Sources vauclusiennes 18
c) Sources thermales 19
Éléments chimiques contenus dans les eaux 21

B. — Phénomènes de surface à la température et à la pression ordinaires. 22
a) PHÉNOMÈNES ACTUELS DE PRÉCIPITATION CHIMIQUE 23
1. *Dépôts d'évaporation saline* 23
Évaporation normale de l'eau de mer 23
Évaporation d'un milieu salin complexe 23
La géologie des gisements salins 24
2. *Précipitation chimique du cuivre et du fer ; dépôts actuels de fer des marais* 25
3. *Précipitation chimique du manganèse* 26
4. *Rôle des organismes dans les phénomènes de précipitation chimique* 26
b) PHÉNOMÈNES ACTUELS DE PRÉCIPITATION MÉCANIQUE 26
1. *Dépôts d'alluvions* 26
Distance de la précipitation par rapport au point d'origine des éléments 26
Concentration des éléments utiles sur le bed-rock ... 27

C. — Phénomènes qui se produisent avec intervention de l'homme.... 28
1. *Phénomènes de métallurgie industrielle* 28
2. *Synthèses* 28
I. A l'état solide 28
II. A l'état fondu 28
III. Par volatilisation 29
IV. En dissolution 29

CHAPITRE III

LES DIFFÉRENTS TYPES DE GISEMENTS

1. *Gîtes d'inclusions* 31
Roches basiques 31
Roches acides 33
2. *Gîtes de ségrégation* 33
A. Différenciation d'un magma basique 34
B. Différenciation d'un magma neutre ou acide 35
3. *Gîtes de départ immédiat ou de ségrégation périphérique* 35
4. *Gîtes de contact du type Banat* 36
5. *Gîtes d'imprégnations diffuses* 37
Localisation des gisements 37
Intérêt industriel des gisements 37
Principaux types de gisements d'imprégnations diffuses 38
Variations de la teneur en cuivre 39
6. *Gîtes filoniens hydrothermaux* 39
A) ÉTUDE DU VIDE INCRUSTÉ 40
1) *Fractures tectoniques* 40
Rôle 40

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Localisation 40
Dimensions 41
Forme 41
Salbandes ; filons composés 42
Champs de filons 43
Influence mécanique du terrain encaissant 43
2) *Fissures de retrait* 45
3) *Filons-couches* 45
4) *Gisements en selles ou poches* 45
5) *Chambres, tuyaux, grottes en terrains calcaires* 46
6) *Rôle des contacts hétérogènes* 47
7) *Vides creusés par les eaux thermales mêmes. Substitutions* 48
B) ÉTUDE DU REMPLISSAGE 48
Age 48
Agent du remplissage 49
Origine et circulation des eaux filoniennes 50
Origine de la métallisation 50
Précipitation des métaux 51
Gangues 51
Structure des filons 52
7. *Les variations des gisements en profondeur. Les altérations en rapport avec la superficie actuelle* 53
A) VARIATIONS ORIGINELLES 53
B) VARIATIONS POSTÉRIEURES 55
Action des eaux thermales ascendantes 55
Action des eaux superficielles 55
Cas du fer 57
Cas du manganèse 58
Cas de l'or 58
Cas du cuivre 59
Cas de l'argent 61
Cas du plomb et du zinc 61
8. *Gîtes sédimentaires* 63
A) GISEMENTS DÉTRITIQUES 63
a) Éluvions 64
b) Alluvions 64
Gisements littoraux 65
B) GISEMENTS DE PRÉCIPITATION CHIMIQUE 66
a) Gisements d'évaporation saline 66
b) Gisements de matières métalliques 66

CHAPITRE IV

PROBLÈMES GÉNÉRAUX

1. *Associations minérales* 68
a) Groupe de l'étain 68
b) Groupe sulfuré 68
2. *Relations des filons et des roches ignées* 69
3. *Provinces métallogéniques* 69

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

DEUXIÈME PARTIE

LES SUBSTANCES MINÉRALES

CHAPITRE PREMIER

AZOTE

1. Usages de l'azote et de ses composés 71
2. Emploi agricole des *nitrates* 72
3. Gisements du *Chili* 73
4. Autres gisements de nitrates 74

CHAPITRE II

FAMILLE DU FLUOR; CHLORE, BROME, IODE

A. — Fluor 75
1. Usages 75
2. Statistique 76
3. Gisements 76
a) Fluorine 76
b) Cryolite 77
B. — Chlore 77
1. Usages 77
2. Gisements 78
C. — Brome 78
1. Usages 78
2. Production 78
D. — Iode 79
1. Usages 79
2. Gisements 79

CHAPITRE III

FAMILLE DU SOUFRE, DU SÉLÉNIUM, DU TELLURE

A. — Soufre 80
1. Usages 80
2. Statistique 81
3. Gisements 82
I. Solfatares 82
II. Solfares 82
α) *Sicile* 82
β) *Louisiane et Texas* 84
γ) *France* 84
III. Gisements de Pyrite 84
α) *Filons de pyrite* : *France, Algérie, Toscane* 85
β) *Amas pyriteux* : *Sain-Bel* 86
Dimensions des principaux amas 88

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

B. — SÉLÉNIUM 89
1. Usages 89
2. Gisements 89
C. — TELLURE 89

CHAPITRE IV

CARBONE

Graphite 90
1. Usages 91
2. Statistique 91
3. Modes de gisement 92
I et II. GRAPHITE CRISTALLISÉ DANS LES ROCHES BASIQUES ET ACIDES 92
Sibérie 92
Ceylan 93
III. GRAPHITE DANS DES GNEISS ET DES TERRAINS MÉTAMORPHIQUES 93
Bohême et Bavière 93
IV. GRAPHITE D'ORIGINE SÉDIMENTAIRE 94
Alpes 94

Diamant 95
1. Nature 95
2. Propriétés 96
3. Usages 96
4. Prix et statistique 96
5. Gisements du *Cap* 98
6. Gisements d'*alluvions* 100

Composés hydrocarburés 101
A. — JAIS ET AMBRE 101
B. — SCHISTES BITUMINEUX 101
Conditions de gisement 102
Principaux gisements 102
Bassin de l'Allier 103
B. d'Autun 103
Mansfeld 104
Menat 104
Saxe 105
C. — PÉTROLE 105
1. Usages 105
2. Extraction, traitement 105
3. Historique. Principaux centres pétrolifères 106
4. Statistique 108
5. Géologie des gisements 109
6. Description des gisements 112
I. PÉTROLES DES ZONES CALÉDONIENNES : *Etats-Unis.* 112
Canada 115
Russie 115
Sibérie 116

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

II. Pétroles des zones hercyniennes : *France*... 116
Algérie, Maroc... 117
Allemagne... 117
III. Pétroles des zones de plissements tertiaires :
Etats-Unis... 117
Mexique, Amérique du Sud... 118
France... 119
Carpathes... 119
Italie... 121
Caucase... 121
Asie... 123
D. — Ozokérite... 124
E. — Bitumes... 125
1. Composition, usages... 125
2. Mode de gisement... 125
Judée, La Trinidad... 125
Gisements divers... 126
F. — Asphaltes... 127
1. Propriétés et usages... 127
2. Principaux gisements... 127
Seyssel, Pont-du-Château... 127
Gard, Gisements étrangers... 128
G. — Gaz naturels... 128

CHAPITRE V

BORE

1. Usages... 130
2. Statistique... 130
3. Gisements... 130
I. Soffioni : *Toscane*... 131
II. Gisements d'évaporation sédimentaires : *Asie Mineure Stassfurt*... 131
III. Gites actuels d'évaporation désertique... 132

CHAPITRE VI

PHOSPHORE

1. Usages... 133
2. Histoire de l'industrie phosphatière et statistique... 135
3. Gisements... 136
I. Apatite : *Montebras, Norvège, Suède, Canada, Cap de Gate*.. 136
II. Phosphates sédimentaires... 137
Archéens, Siluriens, Dévoniens (*Tennessee, Pyrénées*)... 138
Carbonifères... 139
Jurassiques (*Auxois, Lorraine*)... 139
Crétacé inférieur (*Boulonnais, Ardennes, Drôme, Ain, Angleterre*)... 140
Nodules phosphatés du Crétacé supérieur (*Russie, Nord de la France*)... 141
Craies phosphatées sénoniennes (*Picardie, Belgique*)... 143
Craies phosphatées œcènes (*Algérie, Tunisie, Maroc*)... 144

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Phosphates de concentration superficielle sur des terrains calcaires récents, déjà légèrement phosphatés (*Caroline, Floride, Iles Océaniques* 146
III. PHOSPHORITES : *Quercy, Estrémadure, Nassau* 147
IV. DÉPÔTS PHOSPHATÉS DES GROTTES. 149

CHAPITRE VII

VANADIUM

1. Usages 150
2. Gisements 150
3. Pays producteurs 151

CHAPITRE VIII

ARSENIC ET ANTIMOINE

A. — ARSENIC 152
1. Usages 152
2. Statistique 152
3. Minerais 153
4. Gisements 153
I. GISEMENTS DE MISPICKEL 153
II. FILONS ARSENICAUX COMPLEXES 153
III. GISEMENTS DE RÉALGAR ET ORPIMENT 153
B. — ANTIMOINE 154
1. Minerais 154
2. Usages 154
3. Statistique 154
4. Commerce 155
5. Gisements 156
I. GITES DANS LA CHAINE HERCYNIENNE : *Massif Central, Westphalie, La Lucette, Portugal, Transvaal, Australie* 156
II. GISEMENTS TERTIAIRES : *Toscane, Algérie* 157

CHAPITRE IX

BISMUTH ET MOLYBDÈNE

A. — BISMUTH 159
1. Usages 159
2. Statistique 159
3. Minerais 159
4. Gisements 160
I. GITES FILONIENS EN ASSOCIATION AVEC L'ÉTAIN 160
Bolivie 160
Argentine, Australie, Cornouailles, Meymac 160
II. ASSOCIATION DU BISMUTH ET DE L'OR 161
Suède, Norvège 161

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

III) Gisements complexes en association avec le cobalt 161
B. — Molybdène 161
1. Usages 161
2. Statistique 161
3. Gisements 162
I. Gisements de molybdénite 162
II. Gisements de wulfénite 162

CHAPITRE X

SILICIUM

A. — Silice 162
1. Sables de verrerie 162
2. Cristal de roche 162
3. Quartz enfumé 164
4. Calcédoines 164
5. Meulières 164
6. Pierres à aiguiser 164
7. Opale 164
8. Tripoli et terres d'infusoires 165
B. — Silicates 165
1. Mica 165
2. Amiante ou abseste 166
3. Ardoises 166
Ardennes, Angers 167
Pays de Galles 168
4. Feldsphaths et argiles ; 168
5. Kaolin 168
Gisement du Bourbonnais 169
Gisement de Saint-Yrieix 170
Gisements sédimentaires : *Dordogne* 170
6. Gemmes 171
Topaze 171
Emeraude, Grenats, Tourmaline 171

CHAPITRE XI

TITANE ET ZIRCONIUM

A. Titane 173
Usages, Minerais, Statistique 173
Gisements de rutile et de fer titané 174
B. Zirconium 174
Usages, Minerais et gisements 174

CHAPITRE XII

ÉTAIN

1. Usages 175
2. Statistiques 175
Les cours et la production 175

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

Les centres de production ... 176
3. Géologie des gisements ... 178
Minerais, associations de l'étain ... 179
Roches transformées par la venue stannifère, nature du terrain encaissant, variations des filons en profondeur ... 179
I. ÉTAIN PRIMAIRE : ... 180
a) Cornwall ... 180
b) Bretagne ... 182
c) Plateau Central ... 182
d) Portugal, Espagne, ... 182
e) Saxe, Bohême ... 183
f) Asie, Malacca, Indes hollandaises, Yunnan ... 184
g) Australie ... 186
h) Afrique ... 186
II. ÉTAIN TERTIAIRE : ... 186
a) Bolivie ... 186
b) Arménie ... 187
c) Toscane ... 187

CHAPITRE XIII

URANIUM ET RADIUM

1. Usages ... 188
2. Statistique ... 188
3. Minerais ... 188
4. Géologie ... 188
5. Gisements ... 189
Joachimsthal, Portugal, etc ... 189

CHAPITRE XIV

TUNGSTÈNE

1. Usages ... 191
2. Statistique ... 191
3. Minerais ... 192
4. Gisements ... 192

CHAPITRE XV

POTASSIUM ET SODIUM

A. — POTASSIUM ... 194
1. Usages ... 194
2. Statistique et centres de production ... 195
3. Gisements : *a) Stassfurt* ... 195
b) Alsace ... 198
c) Autres gisements ... 199

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

B. — SODIUM 199
1. Usages 199
2. Rôle géologique du sodium 200
3. Minerais 200
CHLORURE DE SODIUM 200
1. Commerce et statistique 200
2. Gisements de sel gemme 201
I. SEL SILURO-DÉVONIEN 202
II. SEL PERMO-TRIASIQUE 202
Russie 202
Salzkammergut, Doubs, Jura, Lorraine 203
Cheshire 203
Pyrénées, Catalogne 204
Algérie 204
Sud-Est de l'Asie 204
III. SEL TERTIAIRE 205
Carpathes 205
Galicie 205
Roumanie 206
Asie 207
Golfe du Mexique 207
IV. SEL ACTUEL 207
Evaporation d'une mer récente (*Sibérie, Zone aralo-caspienne, Asie Centrale* 207
Dissolution des terrains géologiques salifères (*Algérie*) 208
Concentration d'eau douce dans un bassin fermé (*Ouest américain*), ... 208
3. Marais salants 208
SULFATE DE SODIUM 208
CARBONATE DE SODIUM 208

CHAPITRE XVI

LITHIUM

1. Usages 210
2. Minerais 210
3. Gisements 210
I. AMBLYGONITE 210
II. LÉPIDOLITHES 210
III. TRIPHANE 211

CHAPITRE XVII

CALCIUM

1. Usages 212
2. Rôle géologique 212
CARBONATE DE CALCIUM 212
1. Pierres de construction calcaires 212

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

2. Pierres à chaux et à ciments 214
3. Blanc d'Espagne. Craie 214
4. Pierres lithographiques (*Solenhofen*), ... 214
5. Marbres 215
Classification 215
Distribution géographique 216
Synthèse, formation, âge des marbres 216
Exploitation de *Carrare* 217
SULFATE DE CALCIUM 217
1. Usages 217
2. Statistique 218
3. Géologie des gisements 218
Terrains gypsifères 219
L'Albâtre 219

CHAPITRE XVIII

BARYUM, STRONTIUM, MAGNÉSIUM, ETC...

A. — BARYUM 220
1. Usages 220
2. Statistique 220
3. Géologie des gisements 220
I. BARYTINE 220
II. WITHÉRITE 222
B. — STRONTIUM 222
1. Usages 222
2. Gisements 222
I. STRONTIANITE 222
II. CÉLESTINE 223
C. — MAGNÉSIUM 223
1. Usages 223
2. Minerais 224
3. Statistique 224
4. Rôle géologique du magnésium 225
5. Gisements de GIOBERTITE 225
6. Gisements de DOLOMIE 225
7. Gisements de TALC et de STÉATITE 226
8. Gisement d'ÉCUME DE MER OU MAGNÉSITE : *Eski-Cheir* 226
D. — GLUCINIUM 227
E. — THORIUM, CÉRIUM, YTTRIUM 227
1. Usages 227
2. Minerais 227
3. Gisements 227

CHAPITRE XIX

ALUMINIUM

1. Usages : *a*) Aluminium 229
b) Composés de l'aluminium 230
2. Minerais 230

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

3. Statistique 230
4. Rôle géologique de l'aluminium 231
5. Bauxite 231
a) Composition 231
b) Extension 232
c) Origine 232
d) La bauxite en France (Provence, Ariège) 232
e) Autres gisements 233
6. Alumine cristallisée 233
a) *Rubis* et *Saphir* 233
b) *Emeri* 234
7. Alun 234
8. Alunite (*La Tolfa*) 234

CHAPITRE XX

CHROME

1. Usages 237
2. Minerais 237
3. Statistique 237
4. Gisements 238
I. Fer chromé (*Nouvelle-Calédonie, Canada, Asie Mineure, Grèce, Oural*) 238
II. Crocoïse 240

CHAPITRE XXI

FER

A. — Industrie et statistique 241
1. Usages 241
2. Minerais industriels 241
3. Conditions d'exploitation industrielle 242
4. Commerce 243
5. Statistique 243
6. Principaux centres de production 245
7. Réserves de minerais 248
B. — Géologie du fer 248
1. Principaux minerais 248
2. Principaux modes de gisements 249
3. Cycles des minéraux ferrugineux 250
4. Substances accessoires des minerais de fer 251
a) Gangues normales (Chaux, Silice, Alumine) 251
b) Métalloïdes toujours nuisibles (Phosphore, Soufre. Arsenic etc.) 252
c) Métaux associés (Titane, Manganèse Cobalt, Chrome, Vanadium, etc...), ... 253
5. Distribution géographique des minerais de fer 254
6. Description des principaux gisements 255

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

I. Gîtes d'inclusions 255
Ovifak, Japon, Nouvelle Zélande 255
II. Gîtes de ségrégation basique 255
Taberg, Routivara 255
Terre-Neuve, Brésil, Afrique australe 256
Cogne, Alno 256
III. Amas associés a des roches acides ou neutres 256
Kirunavara 256
Oural (Troïtsk, Mont Blagodat, Mont Vissokaya, Mont Magnitnaya 258
Sibérie (Iénisséï, Nikolaïevsk) 259
IV. Gîtes au contact des calcaires (Type Banat) 259
Banat 259
Traverselle 259
Arizona 261
V. Filons 261
a) Filons d'oligiste (*Missouri, Framont*) 261
b) Filons de sidérose (*Siegen, Allevard, Nord-Ouest de l'Espagne*) 261
c) Filons de pyrite 262
VI. Chapeaux de filons pyriteux 262
La Tafna ou *Beni-Saf* 263
Djebel-Ouenza 263
Tunisie et autres gisements 264
VII. Gisements de substitution a des calcaires 264
Gîtes d'Angleterre (Cumberland, Lancashire) 265
Gîtes de Bilbao 266
Gîtes des Pyrénées (Rancié, Canigou, Corbières) 268
Styrie et *Carinthie* 270
Silésie, Ile d'Elbe 270
VIII. Gisements d'origine sédimentaire 271
1. Terrains cristallophylliens : 272
Gellivara, Grängesberg, Dannemora 273
Mokta-el-Hadid, Krivoï Rog, Lac Supérieur 275
Autres gisements 276
2. Silurien 276
Asturies, Maine-et-Loire, Basse Normandie 276
Pays-de-Galles, Norvège, Nucic, Clinton 278
3. Dévonien : *Diélette, Asturies* 278
4. Carbonifère : *Ruhr, Angleterre, France* 279
5. Lias : *Côte d'Or, Saône-et-Loire* 279
Cleveland, Lorraine 280
6. Jurassique moyen : *Ardèche, Wurttemberg* 283
7. Crétacé : *Hartz, Bourgogne* 284
8. Tertiaire : *Kertch* 284
9. Mers actuelles 284
IX. Sédiments des lacs et marais 284
X. Gisements d'altération continentale 285
Chine 285
Franconie 285
Berry 286
Latérite (*Cuba*) 287
Alios 287

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXII

MANGANÈSE

1. Usages 288
2. Commerce 288
3. Statistique 289
4. Minerais 290
5. Conditions de gisement 290
6. Principaux gisements 290
I. Gîtes de ségrégation ou de contact : *New-Jersey* 291
II. Oxydes de manganèse dans les parties hautes de filons métallifères : *Laurion, Milos, Ile d'Elbe, Romanèche, Goultes-Pommiers* 291
III. Silicate et carbonate de manganèse des filons argentifères 293
IV. Amas de substitution dans les calcaires : *Las Cabessès* ... 293
V. Gisements stratiformes : (α) Terrains cristallophylliens : 293
Indes, Brésil, Piémont 293
β) Primaires : *Hautes-Pyrénées, Oural, Espagne* 294
γ) Secondaires et tertiaires : *Caucase (Tchiatoura), Nikopol.* 295
δ) Actuels 295
VI. Gisements d'altération continentale : *Hesse, Nassau* .. 295

CHAPITRE XXIII

NICKEL ET COBALT

A. — Nickel 297
1) Usages 297
2) Commerce 297
3) Statistique 298
4) Minerais 298
5) Modes de gisement 298
6) Principaux gisements 299
I. Inclusions et altérations : *Nouvelle-Calédonie* 299
II. Ségrégations de pyrrhotines nickélifères et cuprifères : *Sudbury* 300
Scandinavie, Haute-Italie 301
III. Imprégnations diffuses ; filons-couches : *Scandinavie.* 301
Alpes (Schladming, Valais), Mansfeld 302
IV. Filons : *Dobschau, Les Chalanches, Gistain, Schneeberg,* ... 302
B. — Cobalt 303
1. Usages 303
2. Statistique 303
3. Minerais 304
4. Géologie 304
5. Principaux gisements 304
I. Inclusions et ségrégations 304
II. Filons 304
Cobalt 304
Guadalcanal, Schneeberg, Transvaal 305
III. Altérations superficielles 305
Nouvelle-Calédonie, Vœl Hiraddog 305

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXIV

CUIVRE

1. Usages 306
2. Statistique 307
Principales mines 308
Principaux centres producteurs 308
3. Prix du cuivre 309
4. Minerais 309
5. Rôle métallogénique 310
6. Principaux gisements 311
I. Inclusions : en roches acides, neutres et basiques 311
II. Ségrégations basiques : *Sudbury, Monte-Catini* 312
III. Imprégnations diffuses, amas 313
a) dans des terrains métamorphiques (à type archéen) : *Scandinavie* (*Röros, Foldal, Vigsnaes, Falun, Kongsberg*). 313
b) dans des terrains non métamorphiques (zones hercyniennes et tertiaires : *Huelva* (*Rio Tinto, Tharsis, San Domingos*) 315
Autres gisements 317
IV. Gîtes filoniens en rapport direct avec des roches éruptives neutres ou acides 317
Serbie, Algérie 318
Caucase, Yunnan, Tonkin 318
Japon, Montana (*Butte, Anaconda*) 319
V. Gîtes de contact en terrain calcaire (Type Banat) : 319
Oural (*Mednoroudiansk*) 320
Ouest américain : *Idaho, Arizona* (*Clifton, Bisbee*), *Mexique*. 320
VI. Filons cuivreux de départ acide. Association avec le groupe stannifère et avec l'or 321
Katanga, Chili, Bolivie, La Prugne, Boccheggiano 321
VII. Filons cupro-plombifères a gangue quartzeuse. *Algérie* (*Kef-oum-Teboul*) 324
Burra-Burra, Boleo d'Inguaran 324
VIII. Filons, a gangues carbonatées, de chalcopyrite ou de cuivre gris 325
Sierra Nevada, Pyrénées, Alpes, Algérie 325
IX. Gites de cuivre natif 326
Lac Supérieur 326
Corocoro 327
X. Gisements a allure sédimentaire 328
a) Grès, conglomérats et schistes cuprifères 328
Mansfeld 328
Boléo 329
b) Calcaires cuprifères 329

CHAPITRE XXV

ZINC ET PLOMB

A. — Zinc 331
1. Usages 331

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

2. Statistique 332
3. Commerce des minerais 333
4. Minerais 333
5. Rôle géologique du zinc 333

B. — PLOMB 334
1. Usages 334
2. Statistique 335
3. Commerce 336
4. Evaluation de la valeur d'un filon de plomb 337
5. Minerais de plomb 338

C. — ÉTUDES DES GISEMENTS PLOMBO-ZINCIFÈRES 338
I. INCLUSIONS, SÉGRÉGATIONS, GÎTES DE CONTACT 338
Balia Maden, Turkestan russe, Transbaïkalie 338
II. ZONES STRATIFORMES A SPINELLES ZINCIFÈRES ET SILICATES DIVERS 339
New-Jersey, Sterzing, Bodenmais 339
III. IMPRÉGNATIONS STRATIFORMES DES TERRAINS CRISTALLOPHYLLIENS 340
Ammeberg 340
IV. FILONS CONCRÉTIONNÉS HYDROTHERMAUX EN TERRAIN NON CALCAIRE 341
a) Filons primaires 343
Grande-Bretagne, Bretagne (Huelgoat, Poullaouen, Pontpéan, La Touche) 343
Meseta espagnole (Linarès-la-Carolina, San Quintin, l'Horcajo, Hien de la Encina) 344
Provence (Les Bormettes) 346
Australie (Broken Hill) 347
b) Filons tertiaires de la chaîne hercynienne 347
Massif Central (Vialas, Pontgibaud, Alloue, Indre, Morvan) 347
Vosges et Forêt-Noire (Giromagny, Sainte-Marie-aux-Mines) 348
Hartz (Sanct-Andreasberg, Clausthal, Rammelsberg) ... 349
Saxe (Freiberg) 350
Bohême (Przibram, Mies) 352
Butres gisements 353
c) Filons tertiaires des chaînes récentes 353
Région de *Carthagène* et de *Mazarron* 353
Pyrénées (Pierrefitte, Argelès, Suelza) 354
Alpes (Grand Clot, les Chalanches, Macot, Pezey) 355
Ligurie et *Toscane* 355
V. GRÈS PLOMBIFÈRES ET CUPRIFÈRES 355
Commern, Mechernich, Saint-Avold 355
VI. GISEMENTS ENCAISSÉS DANS LES CALCAIRES 355
a) *Gisements particulièrement plombeux* 356
1. Type : zone de broyage 356
Eureka (Nevada) 356
Sala (Suède) 357
2. Type : pénétrations compliquées en escalier 357
Cumberland, Flintshire 357
Bassin du Mississipi (Joplin, Galena, Bonne Terre) 357
Mexique (Mapimi, Santa-Eulalia) 358

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

3. Type : contact hétérogène et filons-couches..... 358
Leadville (Colorado)..... 358
Bingham (Utah)..... 359
Bulgar-Maden (Asie Mineure)..... 359
b) *Gisements principalement zincifères.* AMAS CALAMINAIRES 359
La Vieille-Montagne..... 359
Welkenraedt, Bleiberg, Engis..... 360
Prusse rhénane, Westphalie, Pays de Bade..... 361
Sardaigne (Iglesiente)..... 362
Gard et Hérault (Les Malines)..... 362
Drôme (Les Avinières)..... 363
Carinthie (Raibl)..... 363
Haute-Silésie..... 363
Laurion..... 364
Tunisie et Algérie..... 365

CHAPITRE XXVI

ARGENT

1. Usages..... 366
2. Statistique..... 367
3. Détails historiques sur la production..... 369
4. Minerais..... 369
a) Minerais complexes..... 369
b) Minerais d'argent proprement dits..... 370
5. Géologie des gisements..... 370
Variations des filons d'argent en profondeur..... 370
Gangues..... 371
6. Principaux gisements..... 371

I. FILONS QUARTZEUX PLOMBO-ARGENTIFÈRES..... 372
Comstock (Névada)..... 372
Aspen (Colorado)..... 374
Mexique..... 374
Amérique du Sud (Colombie, Pérou)..... 377
Schemnitz (Tchécoslovaquie)..... 377

II. FILONS QUARTZEUX CUPRO-ARGENTIFÈRES..... 378
Montana (Butte-City), Arizona, Nouveau-Mexique..... 378
Pérou..... 380
Bolivie (Potosi, Huanchaca)..... 380
Argentine, Chili (Chañarcillo)..... 381
Japon..... 381

III. FILONS COBALTO-ARGENTIFÈRES..... 381
Annaberg, Schneeberg (Saxe)..... 381
Les Chalanches, Sainte-Marie-aux-Mines, Giromagny..... 383
Guadalcanal, District de Cobalt..... 383

IV. FILONS A GANGUE DE CALCITE..... 383
Kongsberg (Norvège)..... 383
Sarrabus (Sardaigne)..... 385

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

CHAPITRE XXVII

MERCURE

1. Usages 387
2. Statistique 387
3. Géologie 388
4. Principaux gisements 389
Almaden 389
France (*Ménildot, la Mure, Hérault, Corse*), *Palatinat, Deux Ponts* 390
Idria, Santa-Anna, Vallalta, Littai 390
Serbie, Russie 390
Toscane (*Monte-Amiata*) 390
Californie (*Sulphur Bank, New-Almaden, New-Idria*) 391
Gîtes divers (*Huancavelica, Kwei-Tchéou*) 392

CHAPITRE XXVIII

OR

1. Aperçu historique 393
2. Usages 395
3. Statistique 395
4. Répartition des gisements d'or dans le monde 397
5. Minerais et associations 398
6. Géologie des gisements d'or 398
Relations de l'or avec différents types de roches 399
7. Principaux types de gisements 399
I. Inclusions aurifères dans des roches surtout acides .. 399
II. Gisements d'imprégnations diffuses 399
Sibérie (*Iénisséi, Léna*) 400
Inde (*Wainad*) 400
Transvaal (*Lydenbourg, Barberton*) 400
Mozambique, Rhodésia, Madagascar, Afrique Centrale 401
Amérique du Nord (*Dakota, Homestake*) 401
Amérique du Sud (*Guyane, Brésil*) 401
Alpes (*Val Toppa, Gondo, Hohe Tauern*) 402
III. Filons minces et multipliés. — Types primaires 402
Oural (*Bérézowsk, Kotchkar*) 403
Inde (*Wainad, Kolar*), *Annam* (*Bong Miu*), *Laos* 403
Australie orientale (*Ballarat, Bendigo*) 404
Egypte, Brésil, Vénézuela (*Callao*) 404
France (*La Bellière, La Lucette, Le Châtelet, Bonnac*) 405
Bohême, Pays de Galles, Espagne 405
IV. Grands filons tertiaires auro-argentifères 405
Californie (*Mother Lode*) 406
Mexique 406
Amérique du Sud, Japon, Célèbes, Nouvelle-Zélande, Madagascar (*Andavakoera*) 406
Transylvanie et *Tchécoslovaquie* 407

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

V. Gisements d'or encaissés dans les calcaires 407
Transvaal (*Malmani, Pilgrim's rest*) 407
VI. Gisements de tellurures aurifères 407
Transylvanie (*Nagyag, Offenbanya*), *Australie occidentale* (*Coolgardie, Kalgoorlie*) 408
Colorado (*Cripple Creek*) 408
Canada (*Kirckland Lake*) 409
VII. Conglomérats aurifères 409
Witwatersrand 410
Côte de l'Or anglaise, Rhodésia 413
VIII. Alluvions aurifères 413

CHAPITRE XXIX

PLATINE

1. Propriétés et usages 415
2. Statistique 415
3. Gisements 416
I. Alluvions : *Oural, Colombie, Bornéo* 416
II. Gisements dans des roches très basiques : *Oural, Transvaal* 416
4. Associations 417

CHAPITRE XXX

LES SOURCES THERMO-MINÉRALES ET LES EAUX SOUTERRAINES

1. Définition et utilisation 418
2. Origine des eaux souterraines 419
3. *Méthodes d'études des eaux souterraines* 419
I. Méthode d'exploration directe 419
II. Méthode d'observation par les travaux souterrains (Simplon, Boccheggiano, Teplitz) 420
III. Observations indirectes en partant de la surface .. 423
4. *Parcours des eaux souterraines* 423
I. Infiltrations (Terrains granitiques, lœss, micaschistes, calcaires 423
II. Circulation des eaux souterraines (sources ordinaires, sources pérennes, sources vauclusiennes, résurgences, sources thermales 425
III. Retour des sources thermales a la surface (failles filons ; dépressions topographiques 427
5. *Propriétés des sources thermo-minérales* 430
a) Thermalité 430
b) Minéralisation (classification des sources thermo-minérales. 430
6. *Captage des eaux souterraines* 431
Plan et niveau de captage 432
Les opérations du captage 432
Méthodes de captage 433

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC

I. Eaux thermales provenant d'une fracture a griffon accessible 434
A) Eaux non gazeuses (*Maizières, Bourbon-l'Archambault, Evaux*) 434
B) Eaux gazeuses (*Chatelguyon*) 436
II. Eaux thermales provenant d'une fracture a griffon difficilement accessible 436
A) Enceintes successives (*Gard*) 436
B) Puis, sondages et galeries (*Ragaz*) 436
C) Pressions hydrostatiques (*Ussat, Cestona, Bagnères-de-Luchon, Bourbon-l'Archambault, Enghien, Pfaefers*) 436
III. Eaux thermales interstratifiées appartenant a une nappe artésienne (*Vichy-Saint-Yorre*) 439
7. Aménagement des eaux thermales 440

Saint-Amand (Cher). — Imprimerie R. Bussière. — 16 6-1933

Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC