

COLLECTION DES MISES AU POINT

OU EN EST

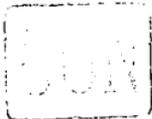
LA GÉOLOGIE

par

L. De LAUNAY

Membre de l'Institut

Professeur à l'École supérieure des Mines



F.L. 70

En vente chez GAUTHIER-VILLARS et C^o

sous le signe de la Victoire

55, quai des Grands-Augustins, PARIS

NOTE DE L'ÉDITEUR



Il était d'usage, aux grands siècles, que l'éditeur présentât lui-même au public les Ouvrages de sa maison. C'était un geste d'urbanité, une prise de contact amicale. Pourquoi ne pas rétablir cette coutume ?

Si nous ne traversons pas une période de crises, parmi lesquelles celle du Livre n'est pas la moindre, nous aurions voulu présenter sous un vêtement original des pensers nouveaux. Mais nous devons vivre encore de restrictions.

La crise du Livre ? En quoi consiste-t-elle essentiellement si ce n'est dans la difficulté de trouver à bon compte un livre de son choix ?

Nous avons voulu présenter à tous ceux qui aiment les Sciences des livres de leur choix. Nous avons pensé qu'après la grande coupure faite par la guerre dans nos habitudes comme dans notre vie, un instant de recueillement s'imposait. Nous devons, pendant quelques heures, fermer notre esprit aux bruits du dehors, et chercher, dans les branches du savoir bouleversées par de trop brusques développements, à quel point nous en sommes.

Des efforts prodigieux ont été faits. Nos savants ont fourni un labeur énorme. Notre âme de vaincu s'est muée, au milieu des transes et de la douleur, en une âme de vainqueur. Mais quels sont dans l'ordre de nos onnaissances spéciales les résultats acquis ?

De quel terrain solide vont partir nos chercheurs, enfin rendus à des études fécondes, pour trouver de nouvelles terres, et nous entr'ouvrir de nouveaux horizons?

Voilà ce que nous avons demandé à de nombreux savants. Chacun des livres de cette collection répond à ces questions pour une science déterminée.

C'est sous le patronage de l'Industrie que nous les placerons. Les Industriels en effet y retrouveront la méthode et le langage scientifiques qui présidèrent au début de leur carrière.

C'est en pensant à eux qu'ils furent conçus, rédigés, mis au point.

Nous avons essayé de les agrémenter en recourant au procédé graphique le mieux harmonisé à la typographie, la gravure sur bois. Un frontispice et un encadrement de Ch. HALLO commenceront chaque Volume.

A. DUCROT.



INTRODUCTION

La géologie n'est pas une science bien vieille. Quoiqu'on puisse, en cherchant, trouver quelques observations géologiques, remontant à l'Antiquité ou à la Renaissance, il n'y a guère plus d'un siècle et demi que l'on a commencé à étudier méthodiquement l'histoire de la terre, de ses océans et de ses montagnes et que l'on a eu l'idée de fonder, sur la connaissance de ce passé, des prévisions rationnelles pour les recherches souterraines et les explorations minières. Dans ce court espace de temps, la géologie a subi une évolution logique du connu à l'inconnu, du simple au complexe (1) : elle a abordé successivement des problèmes de plus en plus difficiles, pour la solution desquels les premiers résultats atteints avaient constitué une base nécessaire; mais, à mesure qu'elle pro-

(1) J'ai raconté en détail cette évolution ancienne de la géologie dans ma *Science Géologique* (Armand Colin, 3^e édition, 1916), à laquelle je demande la permission de renvoyer généralement pour tout l'exposé des théories dont je devrai me borner à indiquer ici quelques points nouveaux. Le choix que je vais faire entre ces nouveautés présentera nécessairement un côté un peu arbitraire. Bien d'autres sujets dont il ne sera pas question auraient mérité une place. Dans quelques années, il y aura lieu sans doute d'en étudier bien d'autres encore.

*

gressait, elle découvrait sans cesse devant elle des champs d'exploration nouveaux. Cette transformation, qui se manifeste partout où l'esprit humain porte son activité et son effort d'investigation curieuse, continue aujourd'hui même sous nos yeux; nous ne pourrions en marquer ici que l'état momentané et nos descendants en connaîtront des phases que nous ne soupçonnons pas. Pour en indiquer la phase présente, pour tracer les frontières mouvantes entre ce que nous savons, ce que nous présumons et ce que nous ignorons, il est peut-être nécessaire de rappeler avant tout quel est le but permanent et immuable de la géologie, vers lequel des générations successives tendent par des chemins changeants.

La géologie est, à la fois, une science théorique et une science pratique. Les deux objets de son étude sont solidaires l'un de l'autre et s'apportent un mutuel appui. Théoriquement, un géologue est un historien et un physicien, ou, si l'on veut, un astronome. Il se propose de découvrir comment s'est constitué, au cours des âges antérieurs, cet astéroïde, sur lequel vit, pense et souffre une humanité portée à le considérer comme le centre de l'univers; il cherche quelle est la constitution profonde de la planète, comme le géographe en étudie la superficie; il prend à

l'occasion un point d'appui dans les comparaisons que peut lui offrir le pullulement de la matière stellaire à travers les espaces infinis; mais il contribue par contre à éclairer ce qui se passe dans ces immensités de l'éther par l'étude attentive du petit grain de sable où la destinée l'a jeté pour quelques jours.

Comme dans une science quelconque, cette curiosité du vrai pour le vrai, indépendamment de toute préoccupation utilitaire, précède et domine les applications pratiques, qui en découlent ensuite naturellement. C'est sur la géologie que doivent se fonder toute exploration minière, toute poursuite de ces éléments chimiques, de ces métaux et de ces métalloïdes, qui constituent, par leurs agencements variés, le monde inorganique. Inutile d'ajouter que l'on n'entreprend pas une tranchée profonde, une recherche d'eau, sans géologie.

Pour arriver à ce double résultat, il a fallu d'abord se constituer un instrument de mesure et d'évaluation chronologique, acquérir en premier lieu la notion que cet instrument existait et que le passé de la terre n'était pas seulement mythologique. Inutile de rappeler comment on est arrivé à établir ces trois notions fondamentales :

1° Que nos terrains, les terrains de nos champs,

ont été formés, pour la plupart dans la mer, par le dépôt de matières meubles, de *sédiments*;

2° Que ces sédiments se sont empilés par couches successives, par *strates*;

3° Que chacun d'eux est daté par ses *fossiles*.

Le premier travail des géologues, qui les a occupés presque exclusivement jusque vers la fin du XIX^e siècle, a donc consisté à tracer et à préciser une échelle stratigraphique, complète et universelle, permettant, lorsqu'on rencontre un terrain, d'apprécier son âge et de dire s'il est antérieur ou postérieur à un autre. Cette première étude, que l'on appelle la *stratigraphie*, est, aujourd'hui, à peu près terminée. Il ne reste plus qu'à la perfectionner et à l'appliquer dans les régions du globe encore peu ou pas explorées, en portant une attention spéciale à l'étude des facies et au tracé des cartes paléogéographiques correspondant aux époques anciennes. Mais ce genre de recherches n'a plus lieu de passionner beaucoup par son intérêt philosophique et, jusqu'au jour où l'observation forcera à admettre quelque principe contradictoire avec des généralisations peut-être un peu trop vite adoptées, la stratigraphie restera sans doute l'objet principal d'un enseignement didactique, en même temps qu'elle nécessitera la plus grande partie des explorations sur le terrain; mais elle

n'attirera plus qu'exceptionnellement l'attention par des idées originales. Dans son domaine, un seul champ d'explorations reste en grande partie nouveau : c'est celui qui envisage les conditions mêmes du dépôt sédimentaire, la formation sous-marine des terrains et leur transformation ultérieure : d'abord dans les profondeurs des eaux, puis dans les mouvements dynamiques du sol, enfin dans les réactions superficielles. Nous consacrerons notre premier chapitre aux recherches récentes de la pétrographie sédimentaire, au problème encore très neuf des transformations sous-marines, enfin aux observations déjà plus anciennes, mais encore insuffisamment pénétrées dans ce qu'on pourrait appeler le subconscient scientifique, sur les modifications superficielles des terrains et sur leurs conséquences pour les gîtes métallifères.

Mais l'attention des géologues est beaucoup plus attirée maintenant par les cas pathologiques, où les lois de la stratigraphie semblent violées, où les empilements de terrains se montrent bouleversés, que par leur régime normal. Ils sont arrivés à la période où on se lasse de voir les individus cheminer sur leurs pieds et où l'on observe de préférence ceux qui se montrent la tête en bas. Ces acrobaties de la nature, que l'on appelle les

montagnes, n'attirent pas seulement les amateurs de pittoresque à la Rousseau, pour lesquels l'évaluation des pentes en degrés fournit une appréciation mathématique des beautés pittoresques. Les savants, eux aussi, s'enflamment pour une telle tétatologie; et leur imagination trouve à se satisfaire dans la contemplation de mouvements qui nous apparaissent singulièrement grandioses en les comparant avec les proportions humaines. C'est l'objet de la science appelée la *tectonique* ou *l'orogénie*. Il n'est plus question aujourd'hui entre géologues que de ces renversements et de ces « charriages », par l'effet desquels les « tectoniciens » modernes nous montrent sans sourciller tout le sol de la Suisse apporté du sud en une série d'écaillés ou de nappes par-dessus une Suisse plus ancienne disparue en profondeur. Si nous voulons faire connaître où en est la géologie, il nous faudra insister sur ces phénomènes dus aux plissements, qui n'ont pas seulement constitué les montagnes actuelles, mais aussi tant d'autres régions, maintenant aplanies, où se sont dressées jadis des saillies alpestres. Ce sera l'objet de notre second chapitre.

D'autre part, l'écorce terrestre superficielle n'a pas été uniquement plissée ainsi comme un cahier de papier que l'on froisse. Elle s'est de plus divisée

par tronçons qui ont, suivant les époques, subi des exhaussements ou des affaissements plus ou moins rapides : tantôt des mouvements rythmés comme ceux d'une poitrine respirant, tantôt des effondrements comme ceux d'une voûte quand s'écartent ses pieds droits. La naissance d'une montagne, en refoulant les flots marins qui couvraient son emplacement, a déterminé ailleurs des submersions pareilles à des ras de marées. Tous ces phénomènes ont amené jadis sur nos continents actuels le passage d'anciennes mers, tandis que l'on trouve, dans nos mers actuelles, l'indice d'anciens continents. Les mers, comme les montagnes, ont leur histoire. Cette histoire des mers, on la connaît encore mal, ne l'ayant guère abordée que par les rivages. Elle constitue un champ de recherches nouveau. La géologie des continents, à laquelle on s'est presque borné jusqu'ici, demande à être complétée par une géologie sous-marine, dont le champ reste presque vierge encore. Il se pose même, à cette occasion, des problèmes qui suscitent une attention quelque peu romanesque, parce qu'ils sont relatifs à des périodes récentes et à des phénomènes dont l'homme a pu être le témoin. Le géologue seul s'émeut en découvrant que le sous-sol parisien, après avoir formé une terre ferme, a été submergé

UNIVERSITÉ DE PARIS
1880

pendant telle ou telle période secondaire ou tertiaire. Mais tout homme lettré devient attentif quand on lui apprend que l'Atlantide engloutie de Platon n'est peut-être pas simplement une fiction et un rêve, ou que d'autres Atlantides encore plus vastes reposent dans les profondeurs du Pacifique. Nous aurons à traiter cette question sans dissimuler toutes les obscurités qu'elle comporte encore.

En restant dans l'ordre d'idées théorique, il est un dernier point de vue qui n'est pas spécial à la géologie, mais que la géologie nous impose aujourd'hui comme les autres sciences : c'est la coordination nécessaire de toutes les recherches éparpillées par nos spécialisations modernes. Plus on va, plus chacun est forcé de restreindre son horizon habituel afin de pouvoir l'embrasser tout entier. Mais il arrive pourtant des moments où l'on doit gravir un sommet assez élevé pour apercevoir un instant les étapes franchies sur d'autres voies et pour en tirer l'occasion d'avancer soi-même sur sa voie propre. Les diverses branches de la géologie n'ont pas le droit de s'ignorer entre elles et la stratigraphie ou la métallogénie ne sauraient méconnaître les progrès de la tectonique, pas plus qu'elles ne peuvent négliger ce que l'on pense aujourd'hui en astronomie ou en physi-

co-chimie. Je me bornerai à quelques mots rapides sur cette question, plutôt pour marquer la place du sujet que pour le traiter à fond.

Enfin, dans un ordre d'idées tout différent, la géologie moderne, sans rien perdre de ses curiosités désintéressées, subit cet entraînement général qui pousse nos démocraties vers les applications pratiques. La crise de la « vie chère » n'est pas pour atténuer cette tendance de notre jeunesse à s'américaniser ou à s'angliciser et à être avant tout préoccupée par le désir des « business » et du « make money ». De plus en plus on demandera à une science de dire ce qu'elle rapporte, on évaluera si « elle paye » et les applications pratiques de la géologie contribueront à former des disciples pour la science plus noble des causes, qui restera la vraie parure de l'esprit humain.

Ces applications mêmes ont, d'ailleurs, leur côté théorique, sans lequel elles se réduiraient à de vagues recettes et tours de main empiriques. Je traiterai, à ce propos, diverses questions qui présentent un intérêt d'actualité et pour lesquelles j'ai essayé d'apporter quelque lumière. Un premier chapitre nous fera examiner les principes nouveaux de la *métallogénie* et de la *géologie hydro-thermale*, dont l'application peut conduire à découvrir des richesses minérales ignorées, ou à

utiliser plus complètement des richesses déjà connues. Nous verrons ensuite par quelles méthodes on peut arriver à découvrir des mines dont aucun indice n'apparaît à la surface, sans recourir, pour cela, à la baguette magique des sourciers ou des trouveurs de trésors. La question de la houille, si angoissante pour notre avenir national, celle du pétrole qui commence à se poser avec une acuité égale depuis qu'on cherche de plus en plus à remplacer la houille déficitaire, enfin la reconnaissance profonde des minerais métallifères par les procédés magnétiques ou électriques nous occuperont alors un moment.

Dans les sujets délicats que je vais aborder ainsi tour à tour, on devra s'attendre à ne pas rencontrer partout la solution des questions posées. Ce sera peut-être déjà rendre service à plus d'un que de lui faire toucher du doigt nos ignorances et d'appeler l'attention des chercheurs sur les grands problèmes encore à résoudre. La nature regarde l'homme avec des yeux pleins d'ombre, et c'est précisément parce que ce sphinx au féminin sourire nous pose sans cesse de nouvelles énigmes captieuses qu'il nous attire et nous fascine : éternellement tentés que nous sommes d'allumer une étincelle fugitive dans ce beau visage mystérieux.

OU EN EST LA GÉOLOGIE ?

CHAPITRE PREMIER

Les Problèmes de la sédimentation.

- I. LA NOTION DE FACIES ET L'Océanographie ANCIENNE. — II. L'ÉVOLUTION SOUS-MARINE DE NOS TERRAINS. LES RÉACTIONS DE LA DIAGÉNÈSE. — III. LES ALTÉRATIONS SUPERFICIELLES (MÉTASOMATOSE).

Toute science est précédée d'une première phase où l'on trouve simple et naturel que les choses soient comme elles sont et où il ne vient pas à l'esprit de se demander comment et pourquoi elles sont devenues telles qu'on les observe. L'enfant paraît souvent étranger à nos surprises parce qu'il est, en réalité, toujours surpris également. Plus tard, il distinguera entre les aspects avec lesquels l'habitude l'aura familiarisé et qu'il ne remarquera même plus et ceux qui lui apporteront une sensation nouvelle.

Ainsi la stratigraphie est née le jour où l'on a interrogé les terrains avec curiosité pour leur demander leur mode de formation. Nous allons bientôt rappeler rapidement

comment la notion des facies implique la possibilité de reconstituer l'océanographie des temps géologiques, une océanographie fossilisée. Mais, pendant longtemps ensuite, on a admis sans discussion que ces terrains étaient parvenus jusqu'à nous tels qu'ils s'étaient formés d'abord, ou, si l'on a eu l'idée de leur changement, on a considéré celui-ci comme à peu près négligeable. L'étape moderne, dont je voudrais dire quelques mots dans la seconde partie de ce chapitre, a consisté à reconnaître que ces terrains avaient sans cesse évolué, qu'ils évoluaient encore, qu'ils participaient, sous nos yeux mêmes, à ce que j'ai appelé « la géologie en mouvement ». Il faut aujourd'hui garder cette notion présente à l'esprit lorsqu'on essaye de classer un dépôt marin plus ou moins ancien, ainsi que nous allons commencer par le faire, d'après ses conditions de formation originelles.

I. LA NOTION DE FACIES ET L'OCÉANOGRAPHIE ANCIENNE.

Nos terrains géologiques représentent les traces tangibles et les effets matériels de tous les phénomènes qui se sont succédé sur la terre depuis le moment où celle-ci a pris une forme stable et s'est consolidée superficiellement. Chaque déplacement de matériaux meubles ou d'éléments chimiques, chaque concentration, dispersion ou substitution, crée incessamment quelque terrain géologique qui, s'il se trouve conservé, marquera plus tard, au besoin après des milliers d'années, le passage de l'époque actuelle et permettra d'en dater les produits et d'en retracer l'histoire. Sur la surface entière de la terre, il se constitue ainsi aujourd'hui et il s'est constitué

dans tous les temps des formations qui méritent à un égal degré d'être envisagées comme des terrains dignes de notre étude. Mais le coup d'œil le plus sommaire sur les phénomènes actuels montre que, suivant les régions, les formations de terrains ainsi définies présentent une très inégale importance, et l'on peut également se rendre compte sans peine qu'ils ont ensuite des chances très diverses d'échapper à la destruction. Ainsi, en archéologie, les restes du passé sont concentrés dans le cercle des anciennes villes et réduits peu à peu à leurs parties souterraines, à leurs fondations. Le passé nous est avant tout révélé par ses cimetières et tend à ne se survivre que par ses morts.

Géologiquement, l'histoire continentale nous est peu connue, parce que ses dépôts ont été restreints et vite éliminés et nous sommes à peu près réduits à écrire l'océanographie du passé. L'activité mécanique des flots marins, le pullulement de la vie dans les océans amènent, en effet, l'accumulation incessante de débris minéraux, ou surtout organisés, qui s'accumulent dans le fond des mers et y sont immédiatement encastrés, protégés par une superposition de sédiments postérieurs. Plus tard, quand le déplacement des mers ramènera ces dépôts vers l'air libre et les fera apparaître sur quelque continent, ils pourront se présenter à nous presque intacts (sauf les modifications dont nous ferons l'examen à la fin de ce chapitre), et leurs plus grandes chances de destruction ou de transformation seront précisément provoquées par ce retour à l'air libre.

Dans la mer elle-même, les produits de destruction et de remaniement détritiques atteignent leur maximum d'intensité au voisinage des côtes et, quand on s'éloigne

vers le large, on est de plus en plus réduit à des accumulations d'organismes, nécessairement minces malgré l'intensité de la vie dans les profondeurs marines, et à de faibles dépôts chimiques. Plus tard, il a suffi que le fond des mers fût relevé de quelques dizaines de mètres pour que les premiers dépôts littoraux devinssent accessibles à nos recherches dans une tranchée de carrière. Les dépôts des grandes profondeurs ont eu nécessairement moins de chances pour émerger, ou ne l'ont fait qu'après une longue période d'évolution chimique sous-marine, par laquelle ils avaient été transformés; en sorte que notre océanographie du passé subit une nouvelle restriction et devient, avant tout, une océanographie littorale.

Mais, en dépit de ces observations, nous possédons quelques terrains géologiques d'origine continentale : en particulier, des dépôts lacustres qui nous ont gardé, avec une fidélité toute particulière, les restes les plus fugitifs, les plus fragiles de l'activité animale sur leurs bords; et nous possédons aussi des dépôts de mers profondes, d'autant plus précieux pour la science et recherchés avec plus de soin qu'ils sont plus rares. Or, chacun de ces terrains lacustres ou marins porte, dans sa composition même, dans les indices de modifications subies après coup, dans les organismes qu'il renferme, le moyen d'écrire toute son histoire, depuis le moment où il s'est déposé sur une côte ou au large, dans une eau chaude ou froide, dans un courant venant de l'est ou de l'ouest, à l'embouchure d'une rivière ou au pied d'une falaise, jusqu'à l'heure où notre curiosité vient s'attacher à lui. Comme je l'ai annoncé, nous commencerons par examiner la première phase de cette histoire, celle

de la formation initiale; nous chercherons ensuite à nous représenter la seconde étape, celle de l'évolution que les terrains marins ont subie ultérieurement.

L'étude que nous abordons ainsi est, en grande partie, fondée sur la notion de « facies », sur l'aspect extérieur et la structure intime des terrains envisagés. Certains de ces facies, celui des récifs coralliens, par exemple, sont assez spéciaux pour avoir attiré l'attention presque depuis l'origine de la stratigraphie; mais, pendant longtemps, les explorations géologiques étant pratiquement limitées à une étroite région européenne, on a mal interprété ces facies, dont les exemples étaient localisés, et on y a vu, non pas un enseignement sur les conditions de dépôt, mais une indication d'âge géologique. On avait, par exemple, imaginé une époque corallienne pour y englober une série de coraux jurassiques appartenant à des époques différentes, quoique voisines. Plus récemment, l'idée de récurrence s'est victorieusement introduite dans tous les domaines de la géologie; on s'est rendu compte que chaque époque avait pu avoir ses coraux comme ses houilles, que chaque surrection d'une chaîne montagneuse avait produit ses formations de poudingues, ses dépôts salins, ses phosphates et ses minerais de fer. On a alors exagéré dans ce sens jusqu'à vouloir assimiler entièrement toutes les époques entre elles, en les supposant toutes identiques avec la période actuelle. L'actualisme a toujours des séductions puissantes pour les esprits peu imaginatifs qui ne croient qu'à ce qu'ils voient et qui restreignent l'univers à leur village natal, l'infini des temps aux courtes heures de leur vie. C'est un moyen extrêmement commode et qui semble d'une précision parfaite pour apprécier la pro-

fondeur ou la température d'une mer ancienne, que d'y recueillir en place des organismes dont les descendants très analogues offrent aujourd'hui des possibilités de vie limitées à quelques mètres ou à quelques degrés près. Les géologues emploient couramment ce procédé et le caractère même de toute évolution organique, qui est, par définition, un phénomène lent, nous conduit à penser qu'un tel système doit être approximativement exact, surtout pour les périodes les plus voisines de la nôtre. Nous allons en donner aussitôt une application. Mais est-on bien en droit d'attribuer à cette hypothèse une rigueur absolue, alors que notre planète a subi, au cours des âges géologiques, une évolution dont toutes les manifestations de sa surface n'ont pu manquer de subir le contre-coup? Des organismes invertébrés n'ont-ils pas pu s'adapter peu à peu à des conditions de vie différentes sans modification bien sensible de leur forme?

Ainsi, M. Lucien Cayeux, qui a été un maître et un initiateur pour beaucoup des faits signalés dans ce chapitre, a énoncé ce fait curieux que les craies anciennes paraissent s'être formées à quelques centaines de mètres de profondeur maxima, alors que les craies actuelles correspondent moyennement à 5.000 mètres de profondeur. Son affirmation est fondée sur les conditions de vie actuelles des organismes invertébrés, dont les ancêtres, identiques en apparence, se retrouvent dans la craie ancienne, et elle contribue à faire mieux comprendre comment les mers crétacées où s'est déposée cette craie ont pu envahir la plus grande partie de l'Europe, sans qu'il soit nécessaire pour cela d'imaginer, dans l'écorce, un affaissement de 5.000 mètres. La diffé-

rence entre les deux craies tient, selon lui, à ce que la craie actuelle est une boue à globigérines, tandis que les globigérines sont, contrairement à d'anciennes affirmations, très rares dans la craie ancienne et remplacées là par d'autres foraminifères. La profondeur de formation des craies anciennes serait donc très différente de celle des craies actuelles, parce qu'en réalité ce ne sont pas les mêmes terrains en dépit d'une analogie trompeuse : les uns et les autres étant composés d'organismes différents. Dans ce sens, il est très plausible d'admettre le fait énoncé par M. Cayeux et d'en tirer seulement cette conséquence qu'un même facies minéralogique, associé avec des organismes différents, peut correspondre à des profondeurs différentes et induire, par conséquent, en erreur un observateur peu attentif, de même que cette analogie de facies peut se retrouver, nous le rappelions tout à l'heure, à des époques diverses. Mais n'y a-t-il pas quelque excès à admettre en outre comme évident que les mêmes organismes, ou plutôt des organismes très voisins, ont nécessairement, à toutes les époques, vécu dans des conditions identiques? Nous savons cependant aujourd'hui que l'on a confondu, sous le nom vague de coraux, des êtres susceptibles de vivre à des profondeurs très variables (jusqu'à 120 mètres pour les nullipores) et, ici encore, nous arrivons à les distinguer les uns des autres, comme on a pu le faire, dans l'exemple précédent, pour les foraminifères.

Cette objection perd beaucoup de sa force quand on observe, non pas une espèce unique, mais tout un groupe d'espèces, dont il faudrait supposer l'adaptation à des conditions changeantes opérée avec une facilité pareille.

En ce qui concerne ces facies, je considère comme suffisamment vulgarisées pour n'avoir pas besoin d'être reproduites ici les observations courantes qui permettent de diviser les dépôts en sédiments « terrigènes », ayant reçu directement des apports venus d'un continent voisin, et en « dépôts de profondeur », résultant d'une dissolution préalable, où prédominent les débris organisés avec quelques précipités chimiques (1).

On sait également que toute une catégorie de mollusques à conditions de vie bien connues, comme les moules, les huîtres, les oursins, etc., caractérisent les rivages, tandis que d'autres êtres sont propres à la zone « néritique » jusqu'à 200 mètres de profondeur, aux profondeurs « bathyales » comprises entre 200 et 1.000 mètres, ou « abyssales » au-dessous de 1.000 mètres. Je préfère insister sur le rôle respectif des organismes calcaires et siliceux, sur la manière dont se sont opérées les concentrations de certaines matières utiles, et sur quelques observations relatives au sens des courants dans les mers anciennes, à leur salure et à leur température.

Les dépôts actuels des mers profondes se divisent chimiquement en deux grandes catégories : dépôts calcaires à globigérines ou à ptéropodes; dépôts siliceux à radiolaires et à diatomées. Tous sont dus à une pluie fine d'organismes morts, qui tombent incessamment à travers les épaisseurs marines en subissant plus ou moins d'altérations dans leur chute, qui s'accumulent

(1) J'ai résumé ces faits dans ma *Science Géologique*, p. 257, et dans une conférence sur la *Géologie du fond des mers*, reproduite par la *Revue Scientifique* du 3 janvier 1914 et traduite en anglais par la *Smithsonian Institution*, 1915.

sur le fond des mers, le nivellent, l'exhaussent et y sont soumis aux transformations étudiées plus loin sous le nom de la diagénèse.

L'influence de la température sur la répartition primitive de ces organismes est très nette. Dans les eaux chaudes dominant les organismes calcaires; dans les eaux froides ne subsistent que les organismes siliceux. Les uns et les autres empruntent à l'eau de mer des éléments chimiques en dissolution, dont l'origine première est due aux terrains continentaux; après quoi, ces dépôts reviendront à leur tour prendre leur place dans les continents, y subir les effets de l'érosion et recommencer un nouveau cycle. Dans les dépôts des mers profondes, à part quelques grains de quartz apportés mécaniquement, tout le calcaire et toute la silice se présentent d'abord à l'état de débris organisés; et c'est seulement une fois le dépôt effectué que commence l'évolution dont nous parlerons bientôt, par laquelle ces deux éléments, remis en mouvement, retournent peu à peu à l'état inorganique.

Outre le calcaire, la silice et l'argile, qui sont les éléments banals et normaux de tout sédiment marin, nous en rencontrons d'autres dans nos terrains, auxquels nous attachons un intérêt spécial pour leur valeur industrielle, tels que les gisements de sel gemme et de potasse, les pétroles, ou (dans des conditions, comme nous allons le voir, différentes) les phosphates et les minerais de fer. En parler de suite sera une première occasion d'appliquer à des résultats pratiques ces notions de géologie moderne.

Les dépôts de ces divers produits présentent un caractère commun qui les distingue, par exemple, net-

tement des minerais filoniens que l'on exploite pour en tirer du plomb, du zinc, du mercure, de l'argent, de l'or... : celui d'offrir une allure tout à fait analogue à celle des terrains stériles encaissants, allure qui, dans l'ensemble, est toujours lenticulaire. Cependant, les pétroles, étant liquides et engendrant des gaz qui les mettent sous pression, présentent, comme nous aurons l'occasion de le redire plus longuement, cette particularité d'avoir émigré en grande partie hors de leur roche mère. De leur côté, les phosphates ou les minerais de fer, au lieu de s'être immédiatement déposés tels que nous les voyons, ont subi, à diverses reprises, des phénomènes de concentration dus à des remises en mouvement chimiques, des substitutions, des diagénèses, sur lesquelles je me propose d'insister dans la seconde partie de ce chapitre et dont j'envoie, par conséquent, l'étude à ce moment.

La formation des gisements salins, potassiques ou pétrolifères, par laquelle nous commençons, est maintenant explicable sans aucune intervention de ces manifestations profondes, geysériennes ou volcaniques, auxquelles on avait si aisément recours autrefois. Les gisements de sel gemme sont dus à l'évaporation de lagunes salées limitées, où, pour une cause quelconque, il arrivait constamment des eaux chargées de sel, tandis que l'évaporation solaire y pompait de l'eau douce. Ainsi, dans une mer fermée comme la Mer Morte, où le Jourdain apporte en dissolution les sels que renferme une eau douce quelconque, sans qu'aucun émissaire enlève rien de cet apport. De même dans des lagunes séparées d'une vaste mer par un seuil submergé, de manière que l'eau de la mer y pénètre par-dessus le seuil, tandis que

l'eau de la lagune, concentrée par l'évaporation, tombe au fond, où l'obstacle infranchissable du seuil l'empêche de retourner à la mer.

Les gisements potassiques sont un cas extrême et, par suite, exceptionnel de ces évaporations poussées au delà de ce qui se produit à la température normale dans les marais salants : la potasse restant en dissolution longtemps après que tout le sel a été précipité. Mais le mode de formation n'en est pas moins le même.

Quant au pétrole, pour lequel je renvoie à un chapitre ultérieur (1), on est amené à penser que cette concentration hydrocarburée a dû être provoquée par des conditions analogues à celles que nous retrouverons tout à l'heure pour les phosphates, dans la zone de conflit entre des courants fluviaux et des lagunes saumâtres, peut être dans des eaux déjà relativement profondes. Là, les organismes du plankton se sont accumulés au milieu d'un bain de saumure, où ils ont subi une macération qui en a fait du pétrole, habituellement incorporé dans une argile; après quoi, sans accès d'air, ils ont été recouverts par une autre couche argileuse qui les a préservés de la combustion. La différence pratique qui rend à nos yeux un gisement de pétrole si différent d'un gisement houiller tient surtout à ce que le premier est devenu liquide et, par suite, mobile, tandis que l'autre restait solide. Le pétrole peut ainsi monter de lui-même à la superficie, et venir s'emmagasiner dans les couches poreuses de sables et de grès qui surmontent un gisement primitif, alors qu'il faut aller chercher la houille en profondeur.

(1) Voir chapitre VI, page 187.

En résumé, les divers phénomènes dont je viens de dire quelques mots nous apportent des notions précieuses sur l'océanographie des époques géologiques anciennes. Avec les restrictions que provoquent nécessairement les mouvements ultérieurs du sol étudiés au chapitre suivant, on a pu ainsi tracer des cartes représentant le tracé approximatif des anciens rivages et les courbes de profondeurs marines. L'examen de certains êtres vivants, et notamment des espèces coralliennes, a permis d'y reconnaître, aux époques primaires, une température plus élevée et surtout plus uniforme que celle observée aujourd'hui. Telle ou telle modification de la faune a décelé un brusque changement de cette température, souvent attribuable à un mouvement du sol qui ouvrait ou fermait le passage à un courant chaud ou froid.

Cette notion de courants a donné lieu, dans ces dernières années, à quelques études intéressantes. Ainsi, M. Cayeux a pu montrer, dans le bassin de Paris, qu'il y avait, à l'époque crétacée, des courants de surface et des courants de fond, dont il a fait connaître l'allure. Les courants de surface sont reconnaissables aux éléments qu'ils charriaient. Tel courant, qui arrivait par le détroit de Poitiers, du sud-ouest, apportait du disthène et de la staurotide, dont la présence dans la craie fait reconnaître son rayon d'action. Tel autre courant de surface descendait dans le sens du nord ou sud. Enfin, des courants de fond ont manifesté leur passage par des bancs durs, correspondant aux « hard grounds » actuels.

On a pu même, par une conception beaucoup plus hypothétique, tenter de retrouver la composition et la

température des mers au temps très lointain où la vie y est apparue, en étudiant aujourd'hui le résidu de milieu marin que paraît avoir conservé le sérum sanguin chez tous les êtres vivants. Une ingénieuse théorie de M. Quinton (1) attribue à ces êtres vivants une réaction contre leur milieu ambiant d'autant plus accentuée qu'ils sont plus perfectionnés. On observerait ainsi, chez les plus parfaits, les caractères de la mer au milieu de laquelle ils auraient commencé à évoluer, telle qu'elle était au moment où leur faculté de réagir accrue et leur vie devenue aérienne les ont soustraits à l'influence de ce milieu, en leur permettant de conserver désormais intérieurement les conditions de température et de salure plus favorables à l'activité vitale de la cellule. Or, on possède des notions relativement précises sur l'ordre d'apparition des animaux et sur l'époque à laquelle a été franchi par eux cet échelon qui les sépare de leurs ascendants par une individualité plus forte. La théorie se trouve ainsi d'accord avec cette idée très logique que la mer a dû progressivement, en moyenne, augmenter de salure et diminuer de température (2). Par exemple, les invertébrés marins qui sont restés dans le milieu marin sans réagir contre lui, pareils à une simple membrane osmotique, sont arrivés peu à peu à contenir 33 grammes de chlorure par litre, tandis que les vertébrés terrestres, soustraits depuis

(1) J'ai résumé cette théorie dans mon *Histoire de la terre* (Flammation, p. 237 et 288).

(2) Il est possible qu'il y ait eu, tout au début, lorsque la terre s'est éteinte, bien longtemps par conséquent avant la vie, une première condensation excessive de chlorure salins, dilués aussitôt après par la condensation de la vapeur d'eau : mais nous n'avons pas à en tenir compte ici.

longtemps à toute influence de milieu marin, en contiennent seulement 6 à 8 : ce qui représenterait la salure des anciennes mers. La température optima, dans laquelle sont apparues les premières cellules serait, dans cette théorie, de 44°.

Tous les renseignements sur l'océanographie ancienne, que l'on groupe ainsi par diverses voies, contribueront à nous permettre de raconter plus tard l'histoire des océans.

II. ÉVOLUTION SOUS-MARINE DES TERRAINS. LA DIAGÉNÈSE.

Les phénomènes dont l'étude devrait être envisagée dans ce chapitre si nous prétendions le faire un peu complet, se divisent en plusieurs groupes distincts dans leurs causes comme dans leurs effets : ceux qui, commencés sous la mer aussitôt après la sédimentation et poursuivis longtemps en profondeur, portent le nom de *diagénèse*; ceux qui se localisent actuellement au voisinage de la superficie continentale et que l'on désigne sous le nom de *métasomatose*; enfin, ceux, beaucoup plus intenses et aussi plus extensifs, dans lesquels des conditions exceptionnelles de température, de pression et d'apports minéraux extérieurs sont intervenues et que l'on appelle le *métamorphisme*. Je me bornerai à examiner ici la diagénèse et la métasomatose qui sont les parties les plus neuves dans ce groupe d'études, négligeant les problèmes de métamorphisme chimique, dont le mode d'action reste souvent obscur, et laissant également de côté les interventions mécani-

ques qui ont pu se produire et auxquelles on attribue le nom de *dynamo-métamorphisme*. En principe, l'évolution chimique, qui s'est poursuivie jusqu'à l'époque actuelle sous les influences diverses des trois groupes de phénomènes nommés plus haut, a eu pour premiers résultats d'éliminer progressivement les traces de la vie et de substituer la silice à la chaux; mais elle a aussi provoqué quelques autres phénomènes de concentration, sur lesquels notre attention devra être attirée en raison de leur grand intérêt pratique : notamment la substitution du phosphore et du fer à la chaux.

Une telle évolution commence dès l'instant où un organisme meurt et s'affaisse dans la mer, avant même qu'il n'arrive au fond; elle se poursuit immédiatement sur ce fond. Enfin, après des étapes multiples, elle se continue encore aujourd'hui et elle ne sera complète que lorsque les forces d'équilibre et de cristallisation auront totalement fait disparaître, avec toute trace de vie, tout reste des formes éphémères apparues dans un monde, où cette activité vitale est un fait exceptionnel et accidentel au milieu de l'inertie. Il est remarquable que, pour des raisons encore mal précisées, cette évolution amène des modifications presque identiques, dans chacune des deux étapes, auxquelles nous nous restreignons, aussi bien dans la diagénèse ancienne au fond des mers que dans la métasomatose actuelle et superficielle.

Supposons d'abord un être mourant dans la mer, sans avoir, comme c'est le cas habituel, servi de pâture à un autre être et s'être ainsi incorporé en lui. La chute lente des particules organiques ténues que retiennent en suspension des eaux sans mouvement est accompagnée,

avant tout, d'une dissolution. Cette dissolution est d'autant plus complète que la chute est plus longue, et qu'elle provient d'une nappe marine plus élevée; mais elle est aussi notablement influencée par la fragilité plus ou moins grande et par la constitution chimique plus ou moins stable de la coquille. Ainsi, quand on trouve abondamment un organisme dans un terrain, on peut affirmer que cet organisme existait sur la verticale du même point dans la mer (sauf intervention de courants) et, s'il est abondant quoique fragile, on peut même dire que son habitat normal n'était pas séparé du fond par plusieurs kilomètres de profondeur. Mais, de ce qu'il fait défaut sur le fond on ne peut pas inférer son absence dans les zones superficielles.

Par exemple, les coquilles fragiles des ptéropodes sont dissoutes en moyenne avant d'atteindre 3.000 mètres de profondeur. C'est la raison pour laquelle on n'en trouve pas plus bas. Les globigérines résistent mieux, mais finissent à leur tour par disparaître. Dès lors, dans le Pacifique, plus profond que l'Atlantique, on en rencontre moins dans les grands fonds, quoique la proportion superficielle soit analogue.

C'est après le dépôt que commence la diagénèse proprement dite, et les observations de M. Cayeux sur les minerais de fer montrent que la transformation doit, dans certains cas, se produire très rapidement. Cette transformation, on en connaît aujourd'hui quelques résultats dont je vais donner l'exposé plus loin. Il resterait à en expliquer le mécanisme avec plus de précision par la voie expérimentale. Les conditions du phénomène peuvent, en effet, dans une certaine mesure, être reproduites au laboratoire. Il s'agit, sur une vase

meuble formée de très fins éléments calcaires sous la forme de coquilles (ou, plus rarement, d'organismes siliceux), de superposer sous pression une liqueur saline à environ 2° de température dont la composition est bien connue et d'observer les réactions qui se produisent, après un temps plus ou moins long, par la pénétration capillaire de cette liqueur. On doit se proposer également d'élucider quel mécanisme spécial peut, dans certains cas, comme je vais le dire, introduire du fer ou du manganèse : substitution minéralisante dont on ne paraît pas avoir retrouvé l'équivalent.

Le premier fait frappant manifesté par l'océanographie actuelle est, je l'ai déjà annoncé, l'élimination rapide qui se produit parfois pour la chaux. Des « carottes » de sondage recueillies par l'expédition du *Gauss* au centre de l'Atlantique contenaient déjà moins de chaux dans leur partie profonde depuis plus longtemps soumise à ces réactions que dans la partie haute tout récemment déposée. En même temps, toujours comme à la surface, la proportion de magnésie augmente avec la durée des réactions. Il se fait des concentrations de silice, fer, manganèse, etc., et, finalement, quand cette altération a eu le temps de s'achever, il reste, sur les fonds de mer, une argile rouge ferrugineuse ou manganésifère analogue à celle que, sur nos plateaux calcaires de Normandie, nous appelons une argile de décalcification.

Les observations microscopiques de M. Cayeux aboutissent, pour les temps anciens, à des conclusions tout à fait semblables.

En ce qui concerne le calcaire, il a fort bien montré, notamment, que tout le carbonate de chaux inorganique

du ciment dans la craie parisienne a été d'abord organisé. Une observation ingénieuse lui a prouvé l'abondance primitive des foraminifères même quand on n'en rencontre presque plus de trace. Il se trouve, en effet, que de très nombreux silex creux, formés, comme je vais le dire, par une concentration postérieure de la silice, renferment une poudre crayeuse, où l'on peut voir un témoin subsistant de ce qu'était la craie, non pas à son origine, mais au moment où ces silex l'ont emprisonnée. Or cette poudre intérieure est toujours beaucoup plus riche en foraminifères que la craie encaissante. Le fait est constant et se reproduit dans les concrétions phosphatées, ou encore dans certains minerais de fer qui ont constitué, eux aussi, des milieux conservateurs d'organismes.

Si la dissolution du calcaire semble toute naturelle, on est un peu plus étonné d'abord de constater des remises en mouvement également faciles pour la silice : cette substance que les chimistes ont pris l'habitude de considérer comme insoluble dans leurs expériences de laboratoire, alors que sa dissolution facile se manifeste à chaque pas dans les phénomènes géologiques, beaucoup plus compréhensifs et plus prolongés. La silice se dépose d'abord dans les spicules de spongiaires, dans les carapaces de radiolaires et de diatomées. Après quoi, elle est remise en mouvement et la silice des spicules est tout particulièrement soluble, donc prédestinée à une telle migration. Tantôt elle reste alors dans le calcaire même en y formant un ciment d'opale qui le rend plus consistant; tantôt elle se concentre à l'état de silex noirs; tantôt elle émigre vers les terrains sous-jacents. Ici encore nous retrouvons,

dans l'ensemble, l'équivalent des métasomatoses qui ont produit très récemment à la superficie : ou bien des rognons siliceux empâtés dans l'argile d'altération, ou encore de véritables meulière ou bancs de silex substitués à des calcaires.

Un cas de ce genre se produit, par exemple, dans la « gaize », où la silice joue un très grand rôle et est entièrement d'origine secondaire, soit qu'elle ait été empruntée à la dissolution immédiate de spicules siliceux au fond de la mer, soit qu'elle ait été plus tard mise en liberté par la destruction d'une matière argileuse, ou même importée d'un terrain superposé. Les grès eux-mêmes accusent un nourrissement de leurs grains de quartz tout d'abord détritiques et roulés et la transformation progressive en un quartzite où les grains apparaissent alors au microscope moulés les uns sur les autres. Enfin, dans la craie, il s'est ainsi constitué, par une remise en mouvement qui s'est opérée en plusieurs temps, des rognons de silex noirs, dont la localisation par cordons ou bancs, souvent espacés entre eux à des distances analogues, reste encore assez obscure. Il apparaît très vraisemblable que des parties siliceuses organiques ont commencé à se dissoudre dans la vase sous-marine et ont continué à le faire jusqu'après l'émersion de la craie, en se concentrant sur des points d'élection souvent fossilifères. Mais, avec la même quantité d'organismes siliceux, tantôt ces rognons se sont constitués, tantôt ils manquent dans une craie presque semblable, de même que nous venons de signaler leur localisation, d'origine probablement fort ancienne, suivant des cordons horizontaux. Le phénomène qui a provoqué, sur certains points et à certains niveaux,

une concentration siliceuse de forme très spéciale reste donc à élucider.

J'arrive aux deux substances utiles, le phosphate de chaux et le minerai de fer, pour lesquels une semblable concentration présente un intérêt tout spécial. Dans le cas des phosphates, il paraît y avoir une concentration immédiatement commencée et longtemps prolongée, telle que nous venons de la voir pour la silice. L'origine du phosphore est nettement organique. Le cas du fer est plus complexe et demeure, comme nous le verrons, à certains égards, mystérieux.

Quelques mots d'abord sur les phosphates de chaux. Les phosphates tertiaires, qui contribuent si puissamment à la richesse de la Tunisie, de l'Algérie et du Maroc, sont formés par de véritables feutrages de microorganismes très divers, parmi lesquels dominent les diatomées. Dans la craie parisienne, quand on rencontre des grains phosphatés, chacun d'eux est également constitué par un foraminifère (cette fois unique), rempli et enveloppé de phosphate. On ne saurait guère mettre en doute que l'un et l'autre type de phosphates n'ait passé par la forme organique et ne soit dû à la destruction d'innombrables animalcules. Mais le grain phosphaté, au centre duquel on observe un foraminifère, ne doit pas tout son phosphate à ce seul foraminifère. Celui-ci a servi de centre d'attraction pour des liqueurs phosphatées provenant d'autres organismes voisins.

Ces organismes avaient eux-mêmes dû le trouver en dissolution dans l'eau de mer, où, primitivement, mais à une époque qui peut être très ancienne, il avait été introduit par la destruction et la dissolution partielle d'apatite empruntée à des terrains préexistants ou à

des roches cristallines. Sans cesse, les cours d'eau apportent ainsi à la mer une quantité notable de phosphate qui peut être utilisée par les êtres vivants pour construire leur squelette ou leur carapace, de même que les vertébrés terrestres tirent finalement du sol le phosphate de leurs os par l'intermédiaire des plantes. Quand on cherche dans les mers actuelles les cas où de semblables dépôts phosphatés peuvent se produire, on voit que des hécatombes animales ont lieu là où les eaux sont exposées à de brusques écarts de température, comme à la rencontre d'un courant chaud et d'un courant froid. Tout phénomène géologique, ayant pour résultat de modifier le sens des courants, a dû avoir le même effet en provoquant une pareille rupture d'équilibre; et, notamment, les transgressions marines, amenées par un affaissement du sol, ont exercé, d'une façon très caractérisée, une influence de ce genre.

Le cas des minerais de fer sédimentaires se présente à nous avec plus d'obscurité. On sait, depuis longtemps, que beaucoup de ces minerais, exploités à la surface sous forme d'hématite, sont le produit d'une altération ayant porté sur des carbonates ou silicates plus profonds. M. Cayeux a montré, en outre, que ces carbonates ou silicates de fer sont, en général, d'anciens carbonates de chaux où le fer s'est substitué à la chaux. Cette substitution s'est exercée de préférence sur des carbonates grenus et poreux, tels que des oolithes calcaires, des accumulations d'entroques, ou d'autres coquilles cassées et roulées. Le dépôt primitif sous la forme calcaire avait pu se réaliser à une distance quelconque des rivages; mais la transformation ferrugineuse est une opération littorale et, comme elle paraît avoir suivi

de très près le dépôt, il faut qu'elle ait coexisté avec un mouvement du sol amenant une tendance à l'émerision.

Divers faits montrent que la fixation du fer est ancienne et s'est rapidement effectuée dans les profondeurs marines. Ainsi l'on trouve parfois, au milieu du minerai, des galets perforés de constitution identique, mais dans lesquels la teneur en fer est moindre et dont les débris organisés sont restés essentiellement calcaires. On peut donc admettre que ces galets proviennent d'une zone littorale où la substitution ferrugineuse ne s'exerçait pas au même degré et que, lorsqu'ils sont arrivés au point où nous les recueillons, la transformation ferrugineuse du terrain dans lequel ils se sont trouvés englobés était déjà finie. On observe également que les oolithes des minerais normands ont été souvent chargées de fer et de silice, alors qu'elles étaient encore plastiques.

J'ai dit, en outre, que la réaction paraît avoir été d'ordinaire en relation avec la proximité du rivage et avec une profondeur d'eau très faible. Ce qui permet d'ailleurs de comprendre comment la concentration du fer a pu s'effectuer, tandis qu'elle aurait été bien singulière dans une mer profonde.

D'où vient le fer? Comme origine première, selon toutes vraisemblances, des roches remaniées, triturées et dissoutes dans les phases d'érosion intense qui ont suivi chacun des grands plissements terrestres. Ce fer, d'abord en dissolution dans les eaux, puis dispersé sur le fond des mers par sa précipitation (sans doute à l'état de glauconie), a subi une concentration analogue à celle que nous avons signalée pour la silice, le phosphore, etc. Il paraît avoir donné d'abord de la sidérite,

transformée plus tard en hématite, soit directement, soit par l'intermédiaire de la chlorite.

On explique ainsi pourquoi l'on ne trouve plus d'oolithes ferrugineuses dans les terrains postérieurs à l'infra-crétacé, où ce fer est resté dans la glauconie et n'a pas subi la transformation indispensable pour constituer un véritable gisement industriel.

III. LES ALTÉRATIONS SUPERFICIELLES.

LA MÉTASOMATOSE.

L'évolution d'un terrain ou d'une roche commence, comme nous venons de le voir, depuis sa constitution. Mais les réactions chimiques qui tendent ainsi à éliminer certains éléments, à en introduire d'autres et à modifier le groupement des divers principes dans le sens d'une cristallisation plus parfaite, s'effectuent très lentement pendant tout le temps où roches et terrains se trouvent protégés par un manteau de recouvrement contre les influences superficielles. Elles s'accélèrent, au contraire, chaque fois qu'un épisode géologique ramène les terrains au voisinage de la surface. Il se passe là quelque chose de tout à fait analogue à ce qu'on observe pour les peintures antiques que des fouilles mettent à nu après des siècles d'enfouissement, avec toute la fraîcheur de leur coloris et qui, en quelques mois, s'altèrent alors et disparaissent à l'air.

Les réactions superficielles de ce genre sont groupées sous le nom général de métasomatose et contribuent, pour une part très importante, à l'allure des roches, des terrains sédimentaires ou des minerais métallifères. En

principe, on est amené à constater de préférence les phénomènes de métasomatose liés au voisinage de la superficie actuelle : phénomènes particulièrement bien placés pour être observés par nous puisque nos observations commencent toujours nécessairement par porter sur la zone superficielle où nous vivons. Mais on concevrait une idée très inexacte si l'on s'imaginait que des métasomatoses analogues ne se sont pas produites au cours de toutes les périodes géologiques antérieures. Seulement l'observation de ces métasomatoses anciennes est rare. En effet, il faut, pour qu'elles aient été conservées jusqu'à nous, que l'érosion ne les ait pas atteintes et, par conséquent, qu'elles aient été protégées par un retour en profondeur, à la suite duquel elles ont été précisément soustraites à la suite des altérations superficielles, et conservées intactes sous un manteau de recouvrement, ainsi que nous le faisons remarquer tout à l'heure pour les terrains non altérés. Leur existence implique donc une succession de mouvements complexes dirigés en sens inverse : un premier mouvement qui les a amenés à la superficie pour y être altérés; un second qui les a enfouis de nouveau et protégés en profondeur; et quelquefois encore un troisième qui les a de nouveau relevés vers le jour, de manière à les faire rentrer dans notre champ d'observations.

Si rares qu'elles puissent être, ces métasomatoses anciennes sont, quand on les rencontre, d'un très haut intérêt : parce qu'elles nous démontrent précisément les mouvements inverses du sol auxquels nous venons de faire allusion tout à l'heure et parce qu'elles introduisent, dans la profondeur de nos terrains, cette anomalie, tout d'abord difficilement explicable, de modifi-

cations présentant pour nous un caractère superficiel, que nos mines se trouvent pourtant rencontrer à plusieurs centaines de mètres au-dessous de la superficie.

Ce n'est pas, d'ailleurs, la seule observation qu'il y ait lieu de faire sur la continuité possible, en profondeur, des réactions que nous définissons ici comme superficielles. Indépendamment même de tout phénomène ancien correspondant à une superficie différente de la nôtre, une réaction actuelle, que nous qualifions de superficielle d'après son origine, peut se trouver prolongée jusqu'à une assez grande profondeur, du moins relativement aux profondeurs en réalité très restreintes sur lesquelles portent nos travaux de mines. Il importe donc, avant toutes choses, de bien préciser les conditions dans lesquelles se produisent les phénomènes dont nous nous occupons ici.

Les agents d'altération que nous invoquons en ce moment sont ceux qui se présentent couramment, quoiqu'en proportions variables, dans toutes les eaux de surface : en premier lieu, l'oxygène et l'acide carbonique; puis un certain nombre de sels tels que des chlorures, sulfates et nitrates d'alcalis ou de bases alcalino-terreuses. Les deux éléments actifs par excellence sont l'oxygène et l'acide carbonique, grâce auxquels peuvent s'effectuer, à la condition d'y mettre le temps nécessaire, les dissolutions et les remises en mouvement de substances réputées insolubles dans l'eau douce comme la silice, le sulfate de baryte, le fluorure de calcium, etc... Toute eau qui pénètre dans le sol trouve à exercer des réactions de ce genre, des oxydations et des carbonatations et, par suite, tend à épuiser rapidement ses principes actifs pour devenir

à peu près inerte. Il en résulte aussitôt une différence capitale entre la zone voisine de la surface où se produisent une introduction et une circulation constante d'eaux nouvelles, constamment réalimentées en oxygène et acide carbonique et, d'autre part, la zone plus profonde où les circulations d'eau ne s'effectuent plus que très lentement, par des introductions à très grande distance et où, par conséquent, ces eaux ne parviennent qu'après avoir épuisé leur effet, une fois devenues inertes. Dans cette seconde zone profonde, par définition même, l'eau est sans rapports directs avec la surface, dont elle ne subit pas l'influence; elle n'est pas drainée par les vallées, ou du moins ne l'est qu'en raison d'une influence très lointaine; on a donc affaire à des eaux permanentes que l'on est sûr de rencontrer en tout temps lorsqu'on y pénètre. Au contraire, dans la zone active et superficielle, la circulation du jour à la profondeur, de la profondeur au jour, est constante; les eaux s'infiltrent et reviennent former des sources; une période de sécheresse prolongée peut y faire disparaître les eaux souterraines, comme une phase de pluies peut y amener un afflux anormal.

La limite entre ces deux zones constitue donc une surface théorique, de forme plus ou moins compliquée, au-dessous de laquelle un puits est toujours sûr de rencontrer de l'eau, tandis que, plus haut, il peut en recouper ou non suivant les saisons. On l'appelle, en conséquence, surface hydrostatique, ou nappe phréatique.

Il est aisé de comprendre que cette surface théorique peut être très variable suivant les périodes et, par exemple, s'élever après une série d'années pluvieuses. Elle est, en effet, déterminée uniquement par un équi-

libre provisoirement établi dans le mouvement des eaux, entre l'afflux qui se produit dans un sens et l'écoulement qui s'effectue d'un autre côté dans le même temps. Elle est ainsi déterminée par la largeur des issues et leur débit possible dans un temps donné. L'écoulement des eaux commence par se faire vers la vallée la plus voisine et ne cherche une émergence plus lointaine vers une grande vallée plus basse que lorsque les orifices aboutissant à la vallée la plus proche se refusent à débiter davantage. C'est comme une foule entassée devant une sortie et dont quelques personnes ne se décident à aller vers une porte située à l'autre bout qu'après avoir constaté l'inutilité de leur attente devant la première. La surface hydrostatique reproduit ainsi, par une image atténuée, la surface topographique, en se raccordant avec les principales vallées et s'élevant sous les saillies. Quand on traverse la surface hydrostatique, il peut arriver que l'on ne rencontre pas d'eau si le terrain ne présente pas de fissures ou de vides; mais, dès qu'en continuant à s'approfondir, on atteint une fissure aquifère, l'eau afflue de celle-ci sous pression et vient s'établir dans le puits au niveau où elle aurait dû d'abord être rencontrée.

La conséquence de cette relation avec la topographie est que la surface hydrostatique pourra être très voisine du sol dans un pays plat et pourra, au contraire, s'enfoncer à plusieurs centaines de mètres dans un pays montagneux à relief brusquement accidenté. C'est pourquoi nous avons insisté dès le début sur cette idée que l'expression « superficielle » ne devait pas être entendue dans un sens absolu. Sur un haut plateau des Andes ou sur le bord du Plateau mexicain,

l'on peut parfois traverser verticalement plusieurs centaines de mètres sans échapper aux genres de réactions que nous appelons ici superficielles.

Depuis quelques années on a appris à faire intervenir ces métasomatoses, plus ou moins profondes, plus ou moins anciennes, dans toute une série de phénomènes auxquels on cherchait autrefois des origines internes, volcaniques, geysériennes, etc., ou que l'on prétendait, au contraire, expliquer d'un bloc par une réaction de surface, descendante. J'ai consacré autrefois à ces phénomènes un chapitre de ma *Science Géologique* (1) et je me borne à mettre en évidence deux principaux groupes de phénomènes que j'ai eu à étudier alors.

Le premier groupe comprend l'ensemble des réactions continentales qui se sont réalisées progressivement sur des plateaux calcaires découpés par des vallées profondes et, par conséquent, largement drainés. On y constate d'abord une décalcification superficielle qui transforme les calcaires en argile rouge, dont les tranchées de routes et de chemins de fer mettent en évidence la pénétration irrégulière suivant un dessin de fissures préexistantes. Dans ce cas très fréquent, il y a simple élimination de la chaux, concentration de l'argile précédemment incorporée au calcaire et peroxydation du fer. Mais il peut se produire, en même temps, un déplacement, un transport et une accumulation locale de silice aboutissant à donner de véritables bancs de silex ou de meulière. Et cette silice peut-être accompagnée par la cristallisation de substances plus rares, telles que la fluorine, la barytine, la pyrite de fer, le

(1) Pages 308 à 331.

phosphate de chaux, etc. Comme cas particuliers, pratiquement intéressants, de ces réactions, on peut citer la concentration locale de certaines substances utiles : notamment du fer en grains, de l'alumine à l'état de bauxite, du bioxyde de manganèse, de la phosphorite, ou même, beaucoup plus exceptionnellement, sur des roches déjà nickélifères, de silicates de nickel, tels que les garniérites. C'est dans des cas de ce genre que certains géologues anciens aimaient à invoquer des venues hydrothermales directement arrivées de la profondeur, tandis que d'autres géologues actualistes insistaient avec raison sur l'origine superficielle des substances utiles, mais sans remarquer assez que cette remise en mouvement superficielle aurait été en général impuissante à former un gîte de quelque valeur s'il n'y avait pas eu antérieurement une première répartition singulière de la substance à concentrer, due à des causes beaucoup plus générales.

C'est surtout pour les minerais métallifères d'origine filonienne que l'intervention des idées nouvelles sur le rôle des métasomatoses s'est montrée fructueuse et a permis d'interpréter des contradictions jusqu'alors insolubles (1). Cette théorie me paraît avoir, notamment, tranché toutes les discussions qui se sont élevées, depuis que l'on étudie les gîtes métallifères, sur leur formation par en bas ou par en haut, *per ascensum* ou *per descensum*. Les cas de formation *per descensum* que l'on a constatés et invoqués pour les généraliser sont réels, mais ne constituent, dans leur grande majorité, que des remises en mouvement de minerais préexistants, telles qu'il a

(1) Voir, pour la formation première de ces filons avant leur altération, le chapitre V, p. 142 à 170.

pu s'en produire parfois, même dans des galeries de mines antiques, où l'on a vu des minerais déplacés venir recristalliser sur des outils de fer romains, dans des conditions qui ne laissent place à aucun doute.

C'est également par une large métasomatose appliquée à des minerais primitivement blendeux et encaissés dans des calcaires que s'expliquent les formations des amas calaminaires aux formes irrégulières et aux dimensions toujours limitées. La calamine n'est pas, comme on le croyait, un minerai primitif, mais une transformation du sulfure de zinc par une double réaction sous l'influence d'eaux riches en oxygène et en acide carbonique, en présence du carbonate de chaux.

Enfin, les actions de métasomatose expliquent et permettent de prévoir les modifications, souvent fort importantes et à allure théorique, que présentent de nombreux gisements métallifères en profondeur, notamment quand il s'agit du cuivre ou des métaux précieux. On observe alors, au-dessous d'une zone de peroxydation superficielle, une zone, dite de cémentation, où les réactions chimiques, portées à leur paroxysme, ont accumulé à la fois, le cuivre, l'argent et l'or et qui constituent ainsi des zones d'enrichissement très nettes. Quand on dépasse la zone sur laquelle ont porté ces altérations, que cette zone soit d'ailleurs simplement en rapport avec la surface actuelle, ou qu'elle ait pu dans une certaine mesure être influencée par un état de choses remontant à une période géologique antérieure, on assiste à la disparition brusque de ces enrichissements et l'on entre dans une zone permanente à minerais plus pauvres, qui peut ensuite se continuer très longtemps avec les mêmes caractères.

CHAPITRE II

La Tectonique ou Orogénie.

LES PLISSEMENTS DE L'ÉCORCE TERRESTRE, RENVERSEMENTS, PLIS COUCHÉS, NAPPES, CHARRIAGES, MYLONITES, ETC.

La *tectonique*, ou *orogénie*, qui étudie les déformations mécaniques, plissements et dislocations de l'écorce terrestre, est la branche de la géologie la plus en vogue et celle où ont été obtenus, dans ces dernières années, les résultats les plus frappants. A vrai dire on ne peut plus la considérer comme une nouveauté, puisqu'elle a pris son grand essor entre 1880 et 1890. J'ai pu moi-même exposer, il y a une quinzaine d'années, ses résultats principaux dans un ouvrage didactique (1). Mais elle continue chaque jour ses progrès en s'appliquant à des régions de plus en plus vastes et, d'autre part, le tiers de siècle écoulé depuis les mémoires classiques de Marcel Bertrand qui lui ont donné sa forme définitive, ne paraît pas encore suffisant pour que les résultats acquis puissent être considérés comme des acquisitions banales de l'esprit humain. Bien des hommes cultivés n'en ont, je crois, qu'une idée très vague.

Cependant, il n'est pas besoin d'être géologue ou mi-

(1) La *Science Géologique*, 1^{re} édition de 1905, pages 228 à 247 et 351 à 440.

neur pour apprécier l'importance philosophique de reconstitutions, qui nous montrent, comme dans un cinématographe, la naissance, la vie et la disparition des puissantes saillies montagneuses, où les anciens cherchaient volontiers les corps des Titans foudroyés. A tous égards, la géologie nous fait toucher du doigt cette instabilité, ce caractère provisoire et précaire de notre petite planète, cet incessant évanouissement de ses apparences les plus stables, qui étonne l'orgueil humain. Elle impose ainsi aux menus accidents de notre politique ou de notre vie sociale et économique, dont la terre est le théâtre indifférent, ce recul dans le temps et dans l'espace, sans lesquels nous serions tentés de leur attribuer une importance disproportionnée. Mais, plus que toute autre branche de la géologie, la tectonique produit, sur notre imagination, cet effet de surprise bien connu de tous ceux qui ont assisté à un tremblement de terre. En l'étudiant, on sent le sol s'ébranler, les murs chanceler. On croit voir, aux coups de trompette de l'Apocalypse, les Alpes et les Himalayas incliner leur cîmes, les mers abandonner leur lit, des pays entiers se mettre en marche sur d'autres pays et, dans de tels cataclysmes, le souvenir même de ce que put être la civilisation humaine disparaître comme une fumée.

J'ai insisté ailleurs, et je n'y reviens pas (1), sur ce caractère éphémère que présentent les traits les plus marqués de la structure terrestre, la place des mers aussi bien que la saillie des continents. On sait assez que nulle portion de notre terre n'a été épargnée par

(1) *Histoire de la terre* (Flammarion).

ces mouvements. Pas un point sur lequel n'ait passé et repassé la mer, où ne se soit produit un plissement ou un effondrement. Je vais rappeler bientôt que l'emplacement actuel de certaines chaînes montagneuses a été d'abord dessiné en creux par des sillons marins, peu à peu approfondis. Ces zones instables et fragiles ont commencé par s'affaisser avant de surgir. Plus tard, la trace même des saillies fut quelquefois éliminée à la surface et, là où il y eut une mer, puis une montagne, nous ne voyons plus que la monotonie d'une plaine.

La tectonique a pu ainsi se constituer comme science dans notre bassin houiller du Nord et de Belgique, une des régions les moins accidentées qu'il y ait au monde. Elle y a étudié, à la manière des archéologues, une Pompéi géologique, une vieille chaîne alpestre enfouie sous la cendre des sédiments crayeux. Elle y a trouvé la lumière nécessaire pour comprendre la formation des montagnes actuelles et, aujourd'hui, elle revient de ces montagnes actuelles, maintenant bien élucidées, à d'autres chaînes anciennes, dont subsistent à peine quelques fondations rasées et confuses.

Chaque jour, nous voyons ainsi généraliser les interprétations par charriages et nappes, dont souvent les sondages industriels viennent ensuite démontrer la réalité. Autrefois, on s'efforçait en vain d'expliquer les mêmes faits par le jeu des cassures ou failles. Notre traduction moderne substitue généralement le pli, qui garde une certaine continuité, à la cassure qui l'interrompt. C'est la tendance inverse de celle que l'on observe dans d'autres sciences, où l'on abandonne la conception trop exclusive de la continuité pour envisa-

ger le discontinu. Mais nous retrouverons l'idée de discontinuité quand nous aborderons l'origine des phénomènes.

Ce chapitre aura pour but de mettre au point l'état de la question. Sans recopier ni résumer ce que j'ai pu écrire ailleurs sur le même sujet, je m'efforcerai d'y préciser sommairement les notions fondamentales qui sont nécessaires pour comprendre ces interprétations modernes et pour en appliquer, par exemple, les résultats à la recherche de la houille sous un recouvrement anormal de terrains plus anciens. Conformément à l'esprit général de ce livre, je le ferai en insistant jusqu'à l'excès sur la part d'incertitude et d'hypothèse que peuvent présenter encore certaines affirmations, afin de bien mettre en évidence le point où l'on quitte le terrain solide des observations définitives pour s'embarquer sur les flots inconstants de la synthèse. Mais, forts de ces réserves mêmes, nous serons en droit de demander qu'on n'apporte pas un égal scepticisme en ce qui concerne les faits positifs et désormais démontrés. Le résumé de ces faits sera d'autant plus bref qu'ils ne soulèvent plus de controverses : le plan de notre travail ne comportant pas cette série d'exposés locaux qui occupent journellement les géologues. Après quoi, au risque de paraître cheminer bien lentement vers notre but, nous avancerons étape par étape de manière à serrer progressivement le faisceau des faits épars et à en dégager, si nous le pouvons, la cause première. Il ne s'agit pas, bien entendu, d'exposer ici la tectonique en une vingtaine de pages, ce qui supposerait la science définitivement assise sur des bases inébranlables, mais d'attirer l'attention sur les points les plus inté-

ressants et sur les directions où paraissent devoir se réaliser les découvertes futures.

La première observation essentielle est la suivante. Normalement, les terrains devraient toujours se présenter à nous empilés dans l'ordre chronologique de leurs dépôts : disons Henri IV sous Louis XIII et celui-ci sous Louis XIV. C'est le cas ordinaire dans les régions tranquilles, où, fort heureusement, a commencé à se constituer la géologie. Mais, dans des régions de plus en plus nombreuses, on observe aujourd'hui Henri IV par-dessus Louis XIII : c'est ce qu'on appelle un *renversement*. Ou encore on voit une intercalation de l'époque Henri IV entre deux dépôts du temps de Louis XIII et on l'interprète d'ordinaire par un *pli couché*, pouvant prendre le nom de *nappe* quand sa pente atteint ou dépasse l'horizontale. Enfin, nombre de pays présentent une série de nappes superposées, une *structure en écailles* ramenant plusieurs fois le même groupe de terrains, dans lesquels le plus ancien peut être intercalé entre deux plus jeunes. On dit que ces nappes et écailles ont été apportées à leur place actuelle par *charriage*.

Avant d'aller plus loin, arrêtons-nous un instant sur ces données élémentaires. Je viens de considérer la nappe, ou l'écaille, comme l'exagération d'un pli couché. Cette affirmation implique déjà une part d'hypothèse, quand, ce qui est le cas habituel, la liaison effective de la nappe avec un pli vertical n'existe pas. On s'est demandé souvent si certaines nappes n'étaient pas le simple produit d'un arrachement superficiel sans renversement ni plissement, comme un copeau emporté par un coup de rabot. Même en écartant cette idée, bien d'autres causes d'incertitude ou de discussion subsistent.

Il ne faut pas s'imaginer, en effet, que l'on puisse affirmer souvent avec certitude la communauté d'origine entre telle nappe aujourd'hui isolée et tel pli éloigné, supposé être sa *racine*. Même au temps où l'on considérait comme énorme et presque invraisemblable un charriage de 40 kilomètres, un raccordement de la nappe et de sa racine semblait exceptionnel et le cas du Mont-Joly, étudié par Marcel Bertrand et Ritter, était à peu près seul cité comme exemple bien typique.

Dans d'innombrables cas, la racine n'est même aucunement visible et l'on se borne à supposer son existence en profondeur sous des terrains de recouvrement. Dans d'autres, la liaison est douteuse parce que le facies de la nappe est, en raison du laminage subi, devenu totalement différent. Il arrive ainsi, à l'étonnement des profanes, que, dans une chaîne comme les Pyrénées, les uns font venir les mêmes charriages du nord, les autres du sud et les éclectiques des deux côtés.

On devra, d'ailleurs, se garder de croire que les charriages à très grande distance, dont l'amplitude attire particulièrement l'attention et sur lesquels on controverse avec passion, soient le cas habituel. Là où on est conduit à en admettre l'existence, on a généralement commencé par constater de véritables plis couchés beaucoup plus restreints, qui ont préparé peu à peu à admettre ces vastes phénomènes.

En second lieu, la plupart des nappes ne présentent pas l'intercalation théorique d'un terrain plus ancien entre deux plus jeunes que nous supposons tout à l'heure. Le plus souvent, le terme, qui devrait être inférieur, manque, emporté, croit-on, par l'étirement; mais

pourquoi le terme supérieur de la nappe précédente qui était au-dessous de lui dans cette friction a-t-il résisté? Et, dans le fait, on trouve nombre de nappes où le terrain le plus jeune repose, avec une apparence tout à fait normale, sur le plus ancien, sans répétition du plus jeune au-dessous : en sorte que ces apparences ont pu être longtemps expliquées par un simple jeu de failles amenant à chevaucher en partie les uns sur les autres des tronçons morcelés d'un même système complexe.

Enfin, 3^o, la caractéristique d'une région de nappes est son irrégularité absolue, qui contribue à en rendre l'étude particulièrement difficile. La coupe observée en un point diffère totalement de celle constatée un kilomètre plus loin. Dans un si court intervalle, on peut voir l'épaisseur d'une strate passer de 2 kilomètres à zéro. Chaque nappe doit être considérée comme limitée en tous sens et lenticulaire. Le mouvement qu'elle a subi l'a divisée en tronçons épars, qui finissent quelquefois par n'être plus que des blocs, comme les « Klippen » des Carpathes. Enfin, des plissements postérieurs à la mise en place des nappes ont pu leur donner l'allure illusoire de plis autochtones.

Je me borne à ajouter pour mémoire que les terrains ne portent pas, dans la réalité, une étiquette faisant connaître leur âge avec assurance. Surtout dans les régions montagneuses, les gisements fossilifères sont fort rares, et, pour nombre de bancs sédimentaires, on est amené à procéder par assimilation, aussi bien suivant la longueur d'un affleurement que suivant son épaisseur dans le sens vertical. Ces assimilations deviennent particulièrement hasardeuses dans les régions charriées, où l'âge d'un terrain supérieur ou inférieur n'apporte

plus aucun enseignement sur l'âge des terrains en contact avec lui.

Il y aurait donc, je crois, quelque exagération à admettre comme des certitudes absolues toutes les coupes de régions plissées que dessinent les mémoires géologiques. Les jeunes gens ont souvent tendance à exagérer la parole du maître, jusqu'au jour où ils la contestent et, les charriages étant aujourd'hui de mode, on a pu commettre quelques exagérations, sur la constatation desquelles il serait injuste de se fonder plus tard pour impliquer dans la même suspicion les faits authentiques et bien démontrés.

L'important, pour notre sujet, est que l'existence même des nappes et des charriages, leur généralité et leur grande extension horizontale possible ne sont plus contestables dans l'ensemble. Non seulement, les coupes où l'on a admis de tels phénomènes sont bien souvent les seules imaginables pour interpréter d'un même coup les aspects divers que présente une région naturelle; mais il existe un nombre chaque jour croissant d'exemples, où l'on touche réellement du doigt le phénomène dans sa matérialité, où un travail de mine, un tunnel, un sondage, un puits et parfois un cirque d'érosion naturelle formant fenêtre, permettent en quelque sorte de percer la nappe charriée et de voir au-dessous le terrain plus jeune qui, régulièrement, aurait dû se trouver au-dessus.

Ainsi le renversement du dévonien sur le carbonifère est vérifié par les travaux de mine sur la bordure sud de notre bassin houiller franco-belge. D'autres renversements sont manifestes dans les mines de pyrite du Rammelsberg (Harz), ou dans les gîtes mercuriels

d'Idria en Carniole. La galerie de Valdonne en Provence, les sondages de pétrole nord-africains ont fourni des preuves semblables. « Une fenêtre » du Briançonnais montre de l'éocène ou du jurassique sous le houiller. La fenêtre, devenue classique, de la Basse-Engadine, large de 18 kilomètres sur 50, laisse voir, à travers les nappes empilées de gneiss et de trias, un substratum de schistes lustrés, etc..., et, naturellement, ces vérifications, en démontrant l'existence réelle et la fréquence des nappes, ont enhardi les hypothèses ultérieures, parfois suivies à leur tour de vérifications semblables.

On entend dire couramment que non seulement la Suisse ou les Alpes Orientales, ou encore les Asturies, mais la Tunisie et l'Algérie, et, à l'autre bout de l'Europe, une grande partie de la Suède, sont des pays de nappes. Le Mont-Rose, le Cervin, le Grand-Paradis, sont considérés comme des paquets de nappes. Dans toutes les Alpes Orientales, M. Termier considère qu'il n'y a rien en place. Un jour, ce savant, qui a tant fait pour développer ces idées tectoniques, trouve un pays de nappes dans les Tauern et le Salzkammergut. Puis ce sera la pointe nord-ouest de la Sardaigne; puis le bassin de Saint-Étienne; puis les Asturies (où les charriages tertiaires se superposent aux charriages carbonifères); puis l'Afrique du Nord. Désormais, il n'est plus permis d'étudier un pays à l'apparence géologique bien tranquille sans faire une réserve à l'égard de sa bonne conduite antérieure et sans examiner son casier judiciaire. Après quoi, s'il est démontré avoir participé à un système de nappes, toutes les conclusions pratiques que l'on pouvait être tenté d'émettre à son propos sont remises en question. Les cartes de géographie ancienne

que l'on avait pu tracer deviennent inexactes, puisque chacun des points où l'on a observé tel ou tel facies marin, indice de tel rivage ou tel caractère continental, ont pu subir dans la suite un déplacement horizontal de plusieurs dizaines de kilomètres. Un filon métallifère encaissé dans une nappe doit être supposé cesser au-dessous. Au contraire, les sondages pour charbon qui se sont arrêtés avec une logique apparente à la rencontre du gneiss ou du dévonien sont à reprendre : ce gneiss ou ce dévonien ayant pu être charriés par-dessus le houiller. Enfin, des gisements adventifs de pétrole, incorporés dans une nappe charriée ou sous sa carapace, peuvent provenir d'un terrain plus jeune situé au-dessous, etc., etc.

Et l'on ne se borne pas à étendre ainsi l'idée de nappes et de charriages dans l'espace; on lui attribue également un caractère de généralité dans le temps. Un pays où les couches n'ont pas bougé depuis le trias a pu auparavant être l'objet de nappes hercyniennes. S'il est immobile depuis le carbonifère, il peut offrir néanmoins des nappes en rapport avec les chaînes calédoniennes, etc.

Plus un tel mouvement est ancien, plus la constatation en devient difficile, l'érosion ayant longtemps travaillé depuis lors pour éliminer les nappes supérieures et aplanir la chaîne plissée. Cependant, on connaît, depuis longtemps, en Écosse et en Norvège, des charriages de l'époque silurienne, rattachés aux plissements dits calédoniens. L'étude en a même été faite une des premières. Le long du « Bouclier Scandinave », la zone de renversement dite du « glint » peut être suivie sur 10° de latitude, charriant l'archéen par-dessus le silurien que l'on aperçoit quelquefois au-dessous, à travers

cet archéen superposé, par des «fenêtres». Au nord-ouest de l'Écosse, sur 145 kilomètres de long, on a de même une série d'«écailles» amenant le silurien à alterner plusieurs fois avec l'archéen.

Pour la chaîne hercynienne, le sud du Bassin Franco-Belge est un exemple typique de charriage. On en retrouve d'autres du même âge dans le Bassin de Saint-Étienne et je viens d'en citer en Sardaigne ou dans les Asturies. On se demande maintenant si le bassin houiller de la Sarre, si important pour notre industrie française, ne serait pas charrié par-dessus un autre bassin houiller d'allure toute différente et plus profond.

L'étude de ces charriages primaires est particulièrement à l'ordre du jour depuis que les charriages tertiaires commencent à être bien connus.

Quant aux exemples tertiaires de charriages, ils sont innombrables dans toute la série des chaînes dites alpines : Alpes proprement dites, Carpathes, Afrique du Nord, Sierra-Nevada, Pyrénées, Provence, etc.

Ainsi les trois principales phases de plissement qu'a subies notre Europe accusent la répétition de mouvements dynamiques analogues, avec tendance à se localiser dans le même sens et dans les mêmes régions où s'est effectuée, d'une manière plus générale, la localisation des plissements eux-mêmes. Les nappes et charriages constituent donc, en résumé, malgré leur aspect d'anomalie, un cas habituel de tout plissement montagneux, quel que soit son âge.

Je reproduis (fig. 1 à 3), à titre d'exemples, trois coupes théoriques de chaînes plissées (Alpes Occidentales et Alpes Orientales), qui montreront la façon dont nous sommes conduits à nous représenter l'allure transver-

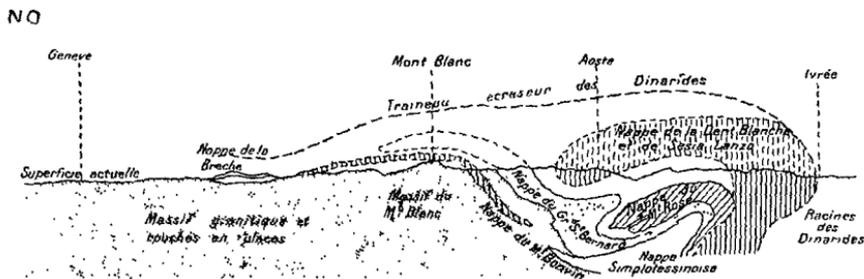


FIG. 1. — Coupe transversale Ivrée-Genève, d'après M. Argand.

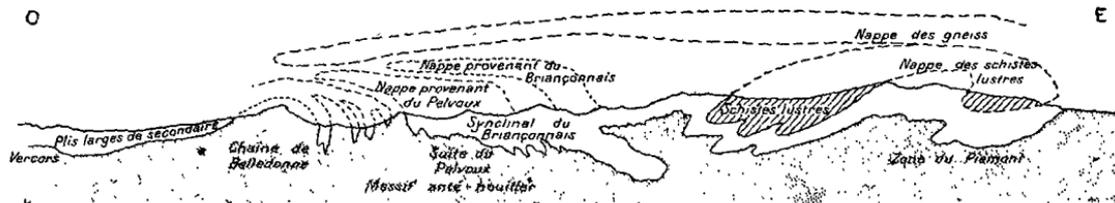


FIG. 2. — Coupe des Alpes franco-italiennes, d'après M. Termier.
(On a laissé en blanc le carbonifère, le secondaire et le tertiaire).

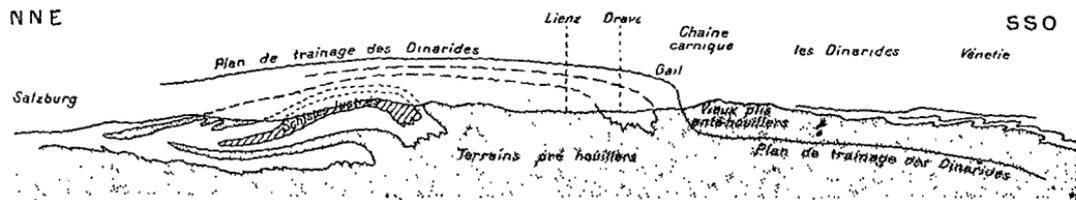


FIG. 3. — Coupe des Alpes Orientales Salzburg-Venise, d'après M. Termier.
(On a laissé en blanc le carbonifère, le secondaire et le tertiaire).

sale d'une chaîne montagneuse. Sur la longueur d'une telle chaîne, le principe reste partout le même; mais l'application varie sans cesse par l'intercalation ou la disparition de quelque nappe. Et à plus forte raison en est-il ainsi à grande distance. Quoiqu'on ait renoncé à considérer les Alpes Orientales et les Alpes Occidentales comme deux entités distinctes, il n'en reste pas moins vrai que les premières sont un pays de grandes nappes horizontales arrivant à prendre une allure en « carapaces », tandis que les secondes sont surtout caractérisées par d'innombrables plis presque verticaux (voir la partie gauche des figures 1 et 2). Ces différences sont telles que l'on peut se demander si, un jour, on ne sera pas conduit de même à englober dans une explication commune des chaînes que nous considérons aujourd'hui comme entièrement distinctes par leur âge, leur allure et leur origine, telles que les Alpes et les Dinarides.

Ayant ainsi rappelé en quoi consiste le phénomène des charriages, poursuivons en maintenant l'explication, en remontant progressivement des observations encore vérifiables sur le terrain à une origine profonde et géogénique.

Revenons tout d'abord sur l'assimilation que nous avons admise tout à l'heure entre les nappes et écailles et les plis couchés. Supposons un ensemble de terrains se plissant et le plissement tendant, pour une cause quelconque, à s'étaler horizontalement, nous aurons le *pli couché*, resté ou non en connexion directe avec sa *racine* et susceptible de former une *nappe*. Un certain nombre de nappes peuvent ainsi s'étaler les unes sur les autres en s'étirant à leur extrémité et le tout peut

reposer sur un substratum réputé *autochtone*, par l'intermédiaire d'une brèche de friction dite *mylonite* (1). Les zones, dans lesquelles ce déversement des plis ou nappes ne s'est pas produit, sont elles-mêmes qualifiées d'autochtones. Tout cela peut être vérifié et, par conséquent, affirmé, dans chaque cas particulier, avec bien des chances de ne pas se tromper. C'est la partie désormais solide de la théorie : sauf à discuter, dans l'application, sur la position et le raccordement de telle ou telle nappe. Mais notre impatience scientifique ne se contente pas de constater des faits, si curieux, si utiles qu'ils soient par eux-mêmes; elle prétend découvrir aussi pourquoi et comment les choses sont ce qu'elles sont et non autres. Ici la tâche devient plus ardue et nous allons vite arriver au moment où il faudra dire : « je ne sais pas », ou tout au plus : « peut-être ». C'est donc là le domaine futur de la tectonique, celui où doivent avoir lieu les découvertes que nous commençons seulement à prévoir.

J'ai déjà dit quelques mots sur l'amplitude possible des phénomènes envisagés, tout en prévenant que les cas les plus habituels sont les plus restreints. Rapportés au rayon de la terre, des charriages de 150 ou 200 kilomètres perdent beaucoup de leur prestige, de même que les hautes montagnes s'effacent sur un globe terrestre construit à l'échelle exacte. Néanmoins, ces dimensions sont telles qu'on ne saurait les expliquer par des causes superficielles et locales. Et de telles causes ne permettraient pas non plus d'expliquer l'étonnante souplesse,

(1) Le substratum primaire pourrait lui-même présenter des poussées inverses. On aurait alors quelque chose d'analogue à ces couches de nuages superposées qui cheminent en sens contraire.

avec laquelle se sont plissés et tordus les bancs de calcaires les plus compacts ou de grès les plus durs. Il faut donc, pour expliquer ce dynamisme, mettre en jeu des causes elles-mêmes très puissantes et très générales : causes qu'il est logique de chercher dans les profondeurs terrestres, sauf à envisager éventuellement l'hypothèse d'influences extra-terrestres ayant pu agir à la façon des marées sur les masses fluides des roches en ignition. Pour progresser dans cette voie, notre premier effort devra donc porter sur la généralisation des faits locaux : une hypothèse ne pouvant avoir de valeur que si elle explique à la fois tout un large ensemble de faits.

Ces généralisations comportent, avant tout, le mécanisme même du phénomène dont nous avons déjà esquissé l'allure générale. On doit ensuite envisager sa répartition géographique à une époque géologique déterminée et la manière dont cette répartition a pu se déplacer avec le temps.

Parmi les observations mécaniques par lesquelles nous commençons, les plus intéressantes nous montrent, en dépit de quelques restrictions déjà indiquées, un *sens général de poussée* qui, en principe, a penché les plis et projeté en avant les charriages d'une région donnée tous dans le même sens, vers une zone à laquelle on donne le nom *d'avant-pays*. Ainsi (comme le montre la figure 4), les charriages alpins accusent dans l'ensemble, au nord de la Méditerranée, un mouvement du sud vers le nord, mouvement dirigé vers des massifs plus septentrionaux, sur lesquels, comme nous allons le voir, avaient agi de même des mouvements analogues plus anciens et plus étendus.

Mais cette loi n'est nullement générale et l'Atlas,

que l'on a voulu en conséquence séparer des Alpes, est, en grande partie, poussé vers le Sud, prolongeant ainsi une interversion qui a commencé à se manifester entre les Alpes et les Apennins en Ligurie. Dans les Alpes mêmes, on a cru plusieurs fois constater des allures en gerbe ou en éventail amenant des renversements dans les deux sens (éventail Briançonnais, éventail du Mont-Blanc, etc.), et, bien que ces éventails aient été souvent supprimés et niés par les tectoniciciens modernes, il n'est pas dit que, sur quelques points, on n'aura pas à les reprendre. En tout cas, les Dinarides (1) accolées au sud des Alpes et comprises dans la même unité géographique, penchent en sens inverse des Alpes vers l'Adriatique, et c'est une des raisons pour lesquelles on y voit une chaîne géologique tout à fait distincte. Dans les Pyrénées, les aspects de renversements dans les deux sens provoquent des explications compliquées avec des discussions dont retrouve l'équivalent pour l'Atlas. On peut encore rappeler le fait que, sur le bord est de la chaîne calédonienne, en Norvège, la poussée est vers l'est, tandis que, sur son bord ouest, en Écosse, elle est vers l'ouest. Malgré la tendance instinctive qui nous pousse à simplifier les lois physiques, il est toujours prudent de ne pas méconnaître les exceptions possibles, point de départ d'autres lois futures. Je ne vois pas, d'ailleurs, pourquoi la poussée interne, par laquelle nous allons expliquer les charriages, aurait nécessairement produit, sur toute la longueur d'une chaîne et pendant toute la durée du phénomène, un

(1) On désigne, sous ce nom général, l'arrière pays des Alpes (Alpes Dinariques, plaine du Pô, Apennins et, probablement Atlas).

déplacement dans le même sens : ce qui revient à établir une distinction excessive entre l'avant-pays d'une chaîne et son arrière-pays (1). Tous deux sont comparables pour moi aux deux mâchoires d'un étau, mais d'un étau dans lequel une des mâchoires surplombe l'autre. Il suffit de remarquer qu'en Europe la mâchoire surplombante est très généralement celle du Sud. La quasi-généralité de cette loi est déjà un fait bien remarquable et bien surprenant.

Je donne ici (fig. 4) un schéma des plissements tertiaires, avec leur sens général de poussée, dans la région méditerranéenne : schéma sur lequel j'ai distingué par un figuré spécial, les Apennins, qui semblent (peut-être avec l'Atlas) appartenir à un système distinct. Pour qu'on pût tirer de ce croquis des conclusions rigoureuses, il faudrait que tous les autres plis fussent rigoureusement synchroniques : ce qui n'est pas le cas. Il faudrait aussi qu'ils n'eussent pas été uniquement tracés d'après les chaînes montagneuses, simple épisode des mouvements orogéniques, auquel nous attribuons, ce semble, une importance trop exclusive parce qu'il se manifeste à la superficie, et probablement aussi épisode final. Ce tracé suffit néanmoins pour mettre en évidence une curieuse symétrie sur laquelle le regretté Albert Cochain a attiré l'attention (2). Si on fait tourner la moitié supérieure de la figure autour d'un point situé au nord des Apennins comme centre, la Lombardie vient prendre la place de la Tyrrhénide, la Hongrie de la

(1) La théorie unilatérale a été préconisée par Suess en réaction contre l'idée d'étau due à Élie de Beaumont (voir *Suess*, tome III, p. 1611).

(2) Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 6 août 1897.

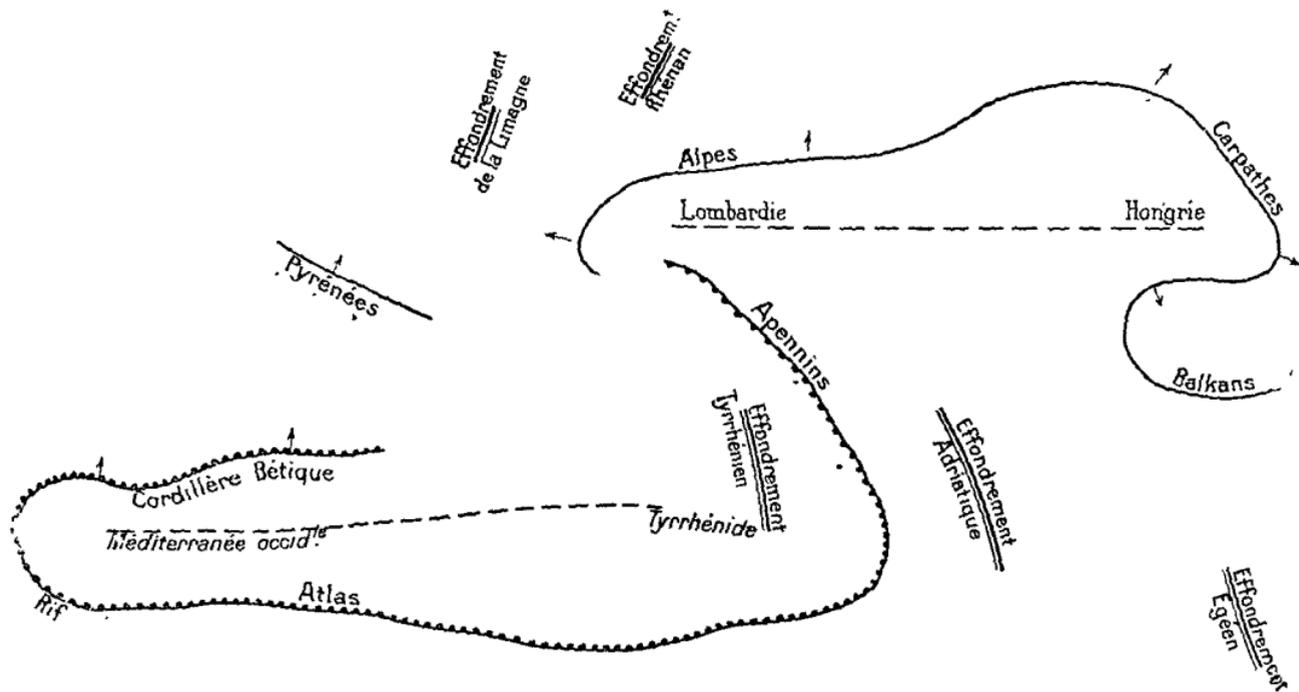


FIG. 4. — Croquis général de la disposition des chaînes alpines, montrant le sens de poussée des charriages. (Dans les Apennins, le sens de la poussée, qui a été omis, est vers l'Est. Dans l'Atlas, on a admis communément, jusqu'ici, une poussée vers le Sud, susceptible d'être discutée en raison des mouvements inverses vers le Nord, observée par endroits).

Méditerranée Occidentale et les Balkans des Pyrénées (dans ce dernier cas, avec inversion du sens de poussée apparent (1). On observe également que les dépressions (marquées d'un axe en traits interrompus) se sont produites là où il y a eu tendance à l'écartement des poussées superficielles.

Un autre point, qui serait d'une importance capitale s'il était rigoureusement démontré, c'est que, d'après les principaux géologues alpins, MM. Marcel Bertrand, Termier, Lugeon, etc., les charriages dont il s'agit paraissent s'être produits *en profondeur* avant le plissement définitif (2). La raison principale de ces savants pour adopter cette idée paraît être qu'il est difficile de se représenter d'immenses masses de terrains amenées à se plisser, à se projeter en l'air et à cheminer sur le sol comme un ruban de métal sortant de la filière dans une tréfilerie. Mais, alors que tout est difficile à concevoir en pareille matière, cet argument de sentiment ne doit pas être considéré comme décisif, et l'on ne voit pas que d'autres observations de fait aient encore apporté, de l'hypothèse en question, une confirmation éclatante.

On a, il est vrai, cru remarquer, en outre, que les parties les plus hautes d'un pays de nappes étaient souvent les plus métamorphosées et on en a donné comme explication la surcharge des terrains aujourd'hui disparus. Les conditions dans lesquelles s'est opéré ce *métamorphisme* restent, de toutes façons, assez mystérieuses. Ainsi, dans les Alpes Occidentales, on

(1) Sens quelque peu problématique. Nous adoptons ici l'idée de M. Termier (*Deux conférences sur la géologie alpine*, 1910, p. 44).

(2) *Science Géologique*, p. 362.

ne comprend pas pourquoi le géosynclinal des « schistes lustrés » a été entièrement transformé par ce phénomène, tandis que le géosynclinal liasique du Dauphiné restait absolument indemne. Le métamorphisme n'est donc pas aussi intimement lié qu'on l'a dit à la condition géosynclinale et semble également n'avoir qu'un rapport bien indirect avec le laminage. Les obscurités, quand on aborde cet ordre d'idées, sont innombrables. Pourquoi, dans la série des schistes lustrés, le trias a-t-il obtenu cette faveur spéciale d'échapper à la transformation entre deux séries du permo-houiller et du mésozoïque devenues cristallophylliennes? Et, dans ce trias, pourquoi le gypse est-il resté particulièrement intact, alors que toute cette série des schistes lustrés a eu deux occasions successives de se métamorphiser : la première avant le mouvement alpin; la seconde après celui-ci?

Si nous conservons cette théorie du charriage effectué en profondeur, c'est donc à titre d'hypothèse plausible, qui attend sa démonstration. Mais, dès lors que nous sommes sortis des certitudes pour aborder le terrain des peut-être, nous pouvons abandonner aussi l'exposé analytique des faits pour tenter un exposé synthétique, qui a toujours l'avantage d'être plus clair, à la condition de le présenter pour ce qu'il est.

Puisque nous prétendons maintenant remonter à la cause première des phénomènes orogéniques, nous admettrons comme infiniment probable que la terre a été d'abord fluide et qu'elle s'est contractée en se refroidissant : d'abord à la surface, puis au-dessous de la première zone superficielle. L'écorce terrestre, la croûte solide et cristalline qui nous porte et dont

l'épaisseur n'est peut-être pas encore bien grande, paraît être constamment minée à la base par des actions diverses : d'un côté, des consolidations, effets du refroidissement progressif, entraînant des réductions de volume et des vides; de l'autre, des pénétrations, des intrusions de magmas ignés provoquant, au contraire, des corrosions et des refusions. L'un des phénomènes n'est pas réellement opposé à l'autre, quand on envisage, dans la terre, des zones de profondeur différente, et l'on conçoit fort bien que, s'il subsiste, à une certaine profondeur, des parties en ignition ou ramenées par une cause quelconque à la fluidité, leur compression en un point puisse provoquer leur montée, leur « jiclement » sur un autre.

Cependant, au-dessus de cette écorce solide, l'existence des mers sur de vastes portions de la superficie détermine sans cesse l'accumulation des matériaux meubles, sables, argiles, débris calcaires, qui constituent nos sédiments; et ces terrains sédimentaires, étudiés par la stratigraphie, forment, par endroits, sur l'écorce cristalline, un manteau dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs kilomètres.

Par suite, l'affaissement du sous-sol cristallin doit entraîner un affaissement correspondant de ce manteau sédimentaire : affaissement qui peut prendre, tantôt l'allure d'une dénivellation entre des fractures appelées failles; tantôt, s'il y a coincement et, par conséquent, pression latérale, celle d'un plissement. L'inégalité des effets à des profondeurs diverses ne peut manquer d'amener des déplacements relatifs de tronçons superposés. En même temps, ces sédiments, comme la croûte cristalline elle-même, peuvent être, non seulement

injectés de roches internes, mais aussi partiellement refondus et introduits ainsi dans les éléments du bain en ignition. Le mouvement de contraction d'un sphéroïde en rotation a dû amener un aplatissement relatif des pôles, la force centrifuge tendant à entraîner l'excès de matière vers l'équateur (1). Il est également très vraisemblable qu'il a subsisté longtemps et qu'il reste même encore, à l'intérieur de la terre, des zones en ignition plus ou moins continues, plus ou moins profondes, au-dessus desquelles des cristallisations, compliquées de refusions momentanées et partielles, ont formé une croûte solide et hétérogène de roches ignées, constamment reprise et refondue à sa base, mais solidifiée dans sa masse par la compression même. Enfin, c'est au-dessus de cette croûte que se sont déposés les sédiments, dont une partie, généralement la plus récente, a gardé un peu de mobilité et de flexibilité, tandis que le reste a été durci et cristallisé par le métamorphisme, de manière à se comporter ensuite à la façon d'une plaque métallique.

Nous nous trouvons donc en présence des hypothèses suivantes : superposition possible en chaque point de strates sédimentaires meubles et déformables sur une écorce solide, elle-même recouvrant un bain en fusion : donc discontinuités susceptibles d'impliquer des coupures dans les sédiments eux-mêmes; affaissements brusques ou progressifs de compartiments solides et profonds entraînant dans leur chute les sédiments supérieurs et forcés de s'introduire dans un secteur

(1) Nous reviendrons sur quelques-unes de ces questions au chapitre IV.

sphérique plus étroit : d'où, enfin, compressions tangentielles, ayant pu être accrues par l'effet de la rotation.

C'est ici que l'on a proposé, en outre, un certain nombre de théories destinées à expliquer la disposition générale de la Terre par une sorte de cristallisation géométrique en rapport avec sa fluidité première. La première tentative de ce genre a été le trop fameux réseau pentagonal d'Élie de Beaumont (contraction en dodécaèdre). Après quoi, on a cru voir, dans le sphéroïde, une disposition à adopter la forme d'un tétraèdre : ce solide géométrique étant celui qui offre le maximum de surface pour un minimum de volume et qui permet, par suite, le mieux, l'adhésion d'une écorce devenue trop ample sur un noyau contracté. Cette hypothèse tétraédrique, qu'il ne faut pas chercher à suivre dans le détail et que l'on a prétendu appliquer de façons bien contradictoires, expliquerait peut-être pourquoi le Pôle Sud forme une saillie montagneuse, la pointe du tétraèdre, et le Pôle Nord une face concave recouverte par la mer, la base du même solide. La chaîne andine serait une des arêtes et le Pacifique une des faces,

Postérieurement encore, on a, comme nous le verrons dans un autre chapitre, cherché l'origine des déformations terrestres dans la séparation de la Lune, qui se serait échappée à l'Équateur, en exerçant aussitôt une attraction considérable sur les matières terrestres (1). La Terre aurait ainsi pris la forme d'une poire (ce qui, sous une forme plus imagée, rappelle le tétraèdre

(1) Page 119.

précédent). Malheureusement, ici encore, la façon de placer ce solide diffère totalement suivant les interprètes. Pour Sollas, le gros bout serait situé dans l'hémisphère continental; pour Lapworth, dans les terres arctiques; pour Love, dans l'Océan Pacifique. En outre, il n'est pas bien sûr que la Lune n'ait pas été, au contraire, captée par la Terre.

Des discussions dont nous aurons à reparler accusent également un désaccord absolu entre les savants sur le point important de savoir si les grandes masses des continents et des mers décèlent aujourd'hui encore un plan préétabli et resté immuable dans ses lignes générales : ce que supposent implicitement toutes les théories précédentes et ce qui permettrait de reconstituer ce système primitif. Pour nombre de savants américains récents, les grandes lignes des océans n'auraient pas changé au cours de l'histoire géologique. Nous croyons beaucoup plutôt, comme nous le répéterons fréquemment dans cet ouvrage, à des variations incessantes, dues dans leur principe à une même cause première, mais constamment influencées par des circonstances nouvelles, en sorte que l'impression finale n'est pas celle d'un plan unique, mais d'un plan constamment retouché par la superposition de plans nouveaux.

Dans la manière dont nous concevons les choses, il y a lieu d'insister sur deux idées essentielles. La première, c'est que, au fur et à mesure de l'histoire géologique, les diverses régions de la Terre ont subi une consolidation inégale dont je rappellerai bientôt la loi, en sorte qu'il s'est constitué, dans certaines régions, jusqu'à la superficie, des massifs solides incapables de

se déformer sans brisure, côte à côte avec des zones encore meubles et pouvant se plisser. La seconde, c'est qu'en une même région déterminée, l'écorce doit se comporter comme constituée par un empilement de zones hétérogènes, séparées entre elles par des discontinuités et susceptibles, dès lors, de jouer l'une par rapport à l'autre. Nous devons nous rappeler plus tard que, par suite de cette discontinuité, le sens du mouvement observé à la surface est un sens *relatif* et non le sens absolu des déplacements profonds. Si nous voyons, par exemple, les sédiments meubles poussés vers le nord, cela équivaut à dire que leur substratum solide s'est déplacé vers le sud. Non seulement, les deux interprétations sont admissibles, mais il y a toutes les chances pour que la seconde soit vraie, le mouvement ayant dû partir du bas pour arriver en haut et ayant

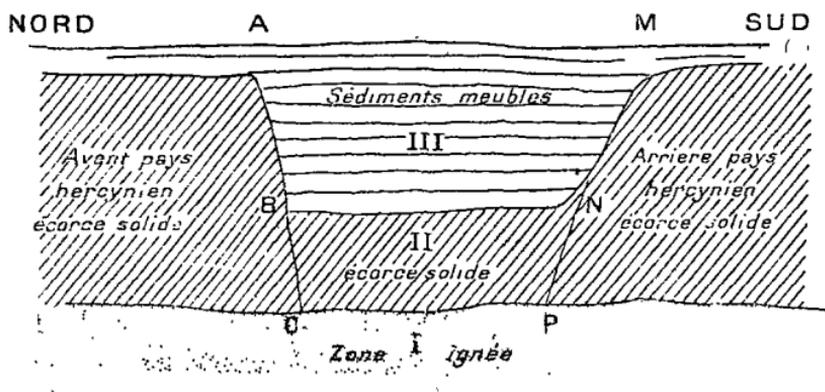


FIG. 5. — Phase I.
État avant le début du plissement tertiaire.

donc agi par entraînement sur les sédiments superficiels.

Considérons maintenant un complexe formé de trois zones superposées I, II et III (fig. 5) et imaginons

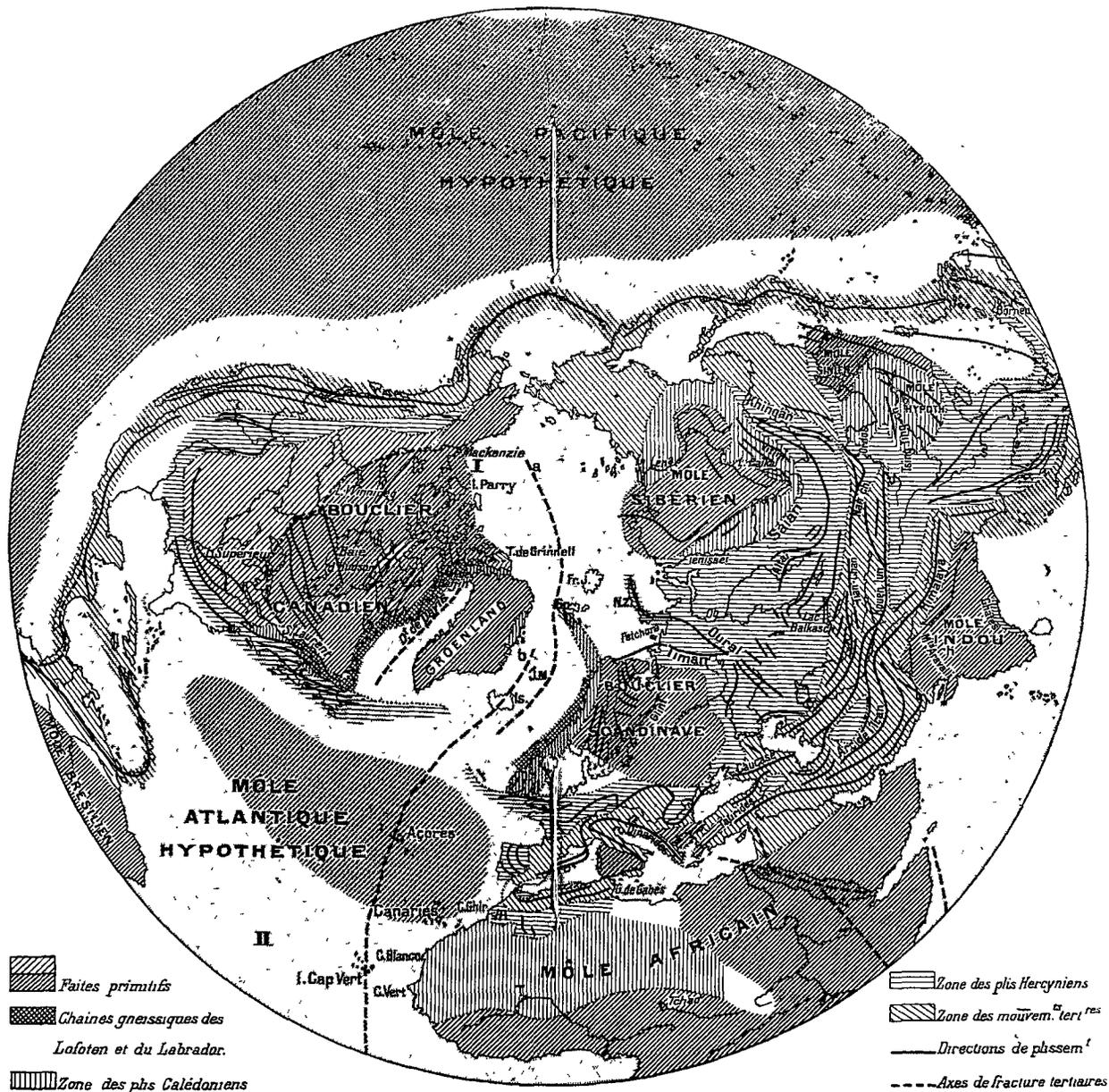


FIG. 10. — Carte générale des zones de plissement terrestre dans l'hémisphère boréal.

un vide tendant à se former par contraction au-dessous de II en I, dans un secteur AM, où l'écorce solide est peu épaisse et recouverte de sédiments meubles sur une épaisseur particulièrement forte : ce qui peut déjà correspondre à l'existence d'un large géosynclinal antérieur encastré entre deux massifs solides d'une chaîne précédente (chaîne hercynienne dans le cas des

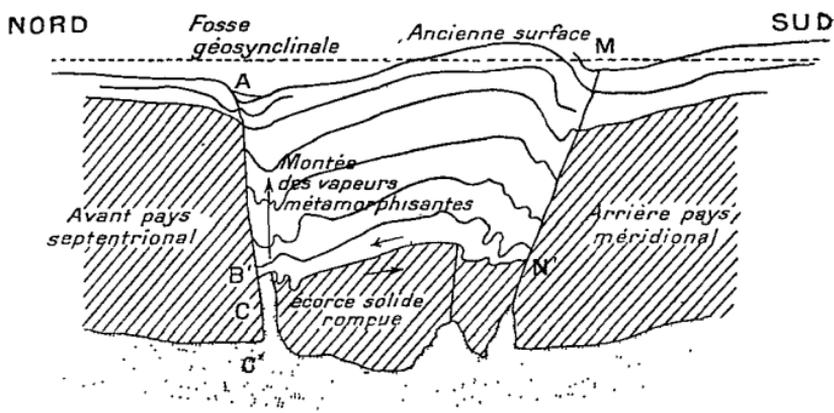


FIG. 6. — Phase II.
Début de la contraction et localisation du géosynclinal.
[L'ancienne surface AM est représentée en -----]

plissements alpins). Le compartiment solide va tomber de BN (fig. 5) en B'N' (fig. 6), où l'espace est plus resserré : donc il va tendre à se rompre et, en même temps, dans la profondeur, la pression de l'avant-pays septentrional, que je suppose prépondérante, va imprimer un mouvement de déplacement vers l'arrière-pays. Les sédiments meubles superposés prendront donc un mouvement relatif en sens inverse (celui que nous observons à la superficie) : mouvement, dans lequel ils commenceront à se plisser et formeront une fosse géosynclinale le long

de l'avant-pays (1), sur la zone où l'affaissement du voussoir solide se fait sentir tout entier, tandis que, plus au sud, le refoulement a pour effet de le relever. Le long de cette fosse géosynclinal, qui est, en somme limitée par une sorte de faille AC, il est naturel que cette faille facilite l'ascension de vapeurs minéralisantes et, par suite, le métamorphisme. L'approfondissement progres-

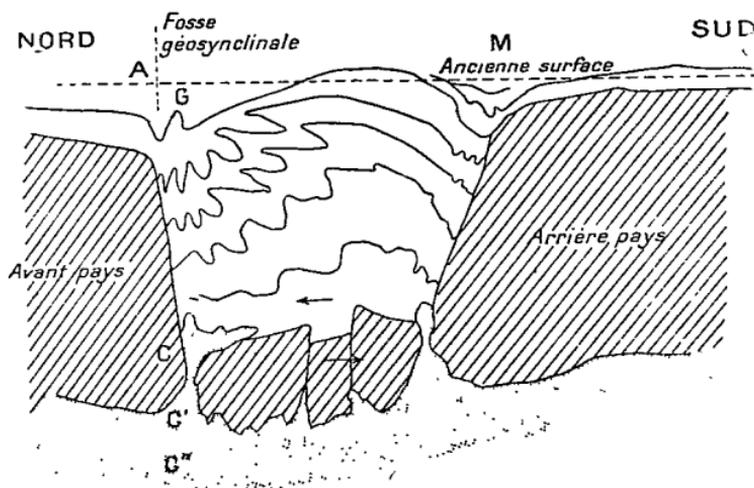


FIG. 7. — Phase III.

Accentuation des plis. Apparition d'un géanticlinal dans le géosynclinal. Tendance au surplombement de l'ancien pays.

sif du géosynclinal, accompagné d'érosion sur ses bords et de sédimentation, lui imprimera les caractères stratigraphiques connus.

Nous ne sommes encore là que dans la phase préparatoire des plissements. Mais, à mesure que l'affaissement de l'écorce solide se poursuit et que le refoulement pro-

(1) Dans la théorie habituellement admise, le géosynclinal a constamment une faible profondeur de 100 à 900 mètres, mais une tendance incessante à s'approfondir.

voqué par l'avant-pays s'accroît vers le sud (fig. 7), ces plissements doivent s'amorcer : plis verticaux et serrés sous la zone géosynclinale, le long de l'avant-pays, avec tendance croissante plus au sud à un déplacement relatif dans le sens du nord et, par conséquent, à une inclinaison des plis couchés dans ce sens. Probablement, il se fait aussi, le long de l'arrière-pays,

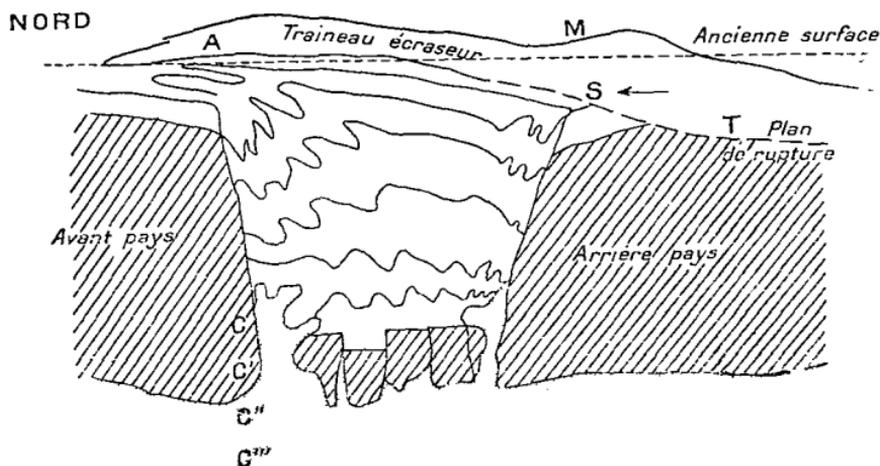


FIG. 8. — Phase IV.

Rupture d'équilibre et mise en marche du traineau écraseur.
Corrosion de l'écorce solide à la base.

des plis verticaux analogues à ceux de la bordure nord (fig. 7 et 8).

Et le phénomène garde cette allure jusqu'au moment où la pression interne, de plus en plus forte, sur la base de l'arrière-pays dans le sens nord-sud, amène une rupture d'équilibre dans la partie haute de celui-ci suivant ST (fig. 8) et, par conséquent, la mise en marche du compartiment supérieur à ST, qui va jouer le rôle de traineau écraseur. On comprend comment ce mou-

vement doit provoquer des nappes et des charriages au-dessous : nappes projetées d'autant plus loin en avant qu'elles sont plus hautes et plus voisines du « traîneau » ; comment en même temps, il doit s'esquisser, le long de l'avant-pays formant obstacle, une tuméfaction de ce secteur superficiel qui va devenir l'amorce d'une montagne (fig. 9). Une compression, qui a proba-

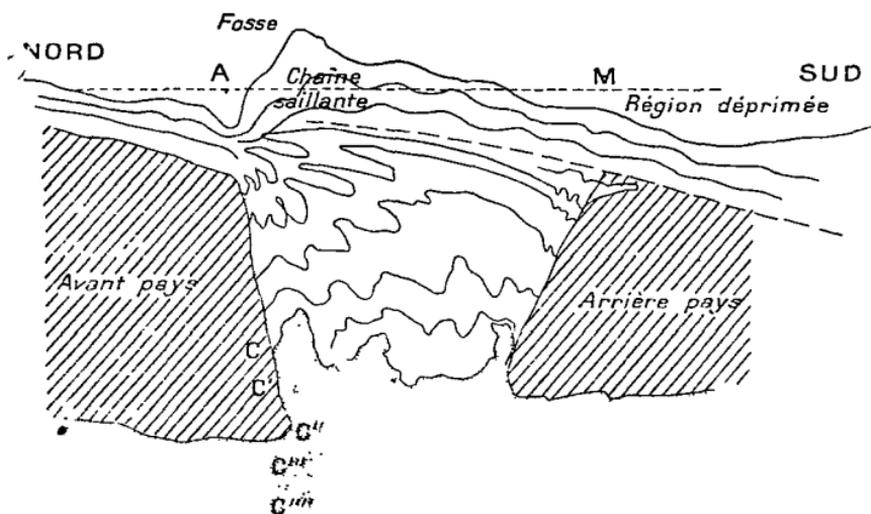


FIG. 9. — Phase V.

Plissement du traîneau écraseur et des nappes. Formation de la saillie montagneuse, bordée par une fosse de sédimentation au Nord.

blement contracté le Jura d'un tiers en largeur et les Alpes de moitié, n'a pu manquer de produire des plis formidables.

A partir de ce moment, on remarquera que toute la partie du traîneau écraseur située au-dessus de l'ancien secteur AM de la figure 5 va participer, avec un certain retard, aux conditions de ce secteur même et sera, par conséquent, sujette à se plisser, en même temps que pour-

ront se rider les nappes au-dessous d'elle. C'est, à proprement parler, la phase orogénique, suivie au fur et à mesure par l'érosion de la chaîne et par la sédimentation de ses produits dans la fosse qui doit continuer à se manifester entre la chaîne et l'avant-pays.

Je n'ai aucune prétention que cet exposé reproduise fidèlement une histoire qui dépasse si singulièrement les proportions de l'observation humaine. Il paraît toutefois susceptible de coordonner la plupart des constatations. Il permet notamment d'expliquer ce fait remarquable que les chaînes montagneuses ont été souvent précédées par un géosynclinal, ou sillon marin, plus ou moins prolongé, plus ou moins continu. Dans les Alpes Occidentales, ce géosynclinal existait avant l'époque houillère et paraît avoir curieusement échappé aux mouvements hercyniens. Après quoi, il a cessé d'être géosynclinal pendant le trias (ce qui accuse, malgré l'observation précédente, une certaine influence sur lui de ces plissements hercyniens). Puis il a reparu au lias et duré jusqu'à l'éocène, moment où les mouvements orogéniques ont commencé. En même temps, on aurait pu observer, plus à l'ouest, d'autres géosynclinaux parallèles, tels que celui du lias Dauphinois; mais le premier seul a subi le métamorphisme régional qui lui communique une allure tout à fait spéciale.

Dans cet essai de synthèse, il me reste encore à considérer la répartition géographique des chaînes plissées, aux diverses époques géologiques, et à montrer comment le déplacement, ou plutôt la localisation des plissements avec le temps, ainsi que leur allure de plus en plus sinueuse, concorde avec les idées précédemment exprimées. A cet égard, je ne puis mieux faire que de

reproduire avec quelques rectifications (fig. 10) une carte, sur laquelle j'ai essayé autrefois (1) de synthétiser l'histoire de l'orogénie terrestre dans notre hémisphère. Le mode de projection adopté, dont le centre est le pôle boréal, la face aplatie du tétraèdre théorique envisagé plus haut, permet de mettre en évidence l'allure concentrique de phénomènes qui ont toujours dû avoir, comme axe de symétrie, l'axe de rotation terrestre, sans doute à peine modifié au cours des âges. Puisque nous attribuons, dans les plissements de l'écorce terrestre, un rôle prédominant à la contraction amenée par le refroidissement, il est naturel de présumer que la force centrifuge équatoriale et la tendance croissante à l'aplatissement polaire ont dû intervenir. C'est, en effet, ce que nous constatons dans la mesure où le trouble apporté par les mouvements récents permet de reconstituer les mouvements plus anciens.

N'oublions pas que les montagnes ont un âge déterminé par l'âge des derniers terrains plissés qu'elles contiennent et que, pour le géologue, des pays aujourd'hui aplanis, comme le Bassin houiller Franco-Belge, ont été jadis montagneux. On sait, en outre, que notre hémisphère a été l'objet de quatre plissements principaux (chacun subdivisé en plusieurs phases successives) : l'un, dit *huronien*, avant le précambrien; le second, dit *calédonien*, à la fin de l'époque silurienne; le troisième, *hercynien*, au milieu du carbonifère; le quatrième, dit *alpin*, vers le milieu de l'époque tertiaire.

Le principe adopté sur notre carte a été de repré-

(1) *Science Géologique*, pl. I.

senter par des teintes de plus en plus claires les diverses parties de la Terre dans l'ordre où elles se sont ainsi plissées et transformées en chaînes montagneuses. Mais il faut bien entendre, comme je viens de l'énoncer, que ce déplacement apparent a été surtout une *localisation* des phénomènes, qui ont dû commencer par englober l'ensemble de la superficie pour restreindre progressivement leur champ d'action. Il serait donc plus exact de dire que les teintes de notre carte sont de plus en plus foncées à mesure que l'on aborde des régions ayant plus anciennement échappé par leur consolidation définitive aux plissements ultérieurs.

Comme notre attention est naturellement attirée de préférence sur cette dernière étape dont les effets restent le plus visibles, nous éprouvons ainsi l'impression que la superficie terrestre est divisée : d'une part, en zones de plissement, souvent bordées par des zones de dislocation volcaniques et de l'autre, en plates-formes solides sur lesquelles les mouvements orogéniques n'ont plus produit, dans les temps secondaires et tertiaires, que des déplacements verticaux, soit vers le haut, soit vers le bas. Mais, quand on envisage l'ensemble des phénomènes dans le passé, on s'aperçoit que les zones ayant joué le rôle de plates-formes solides dans les derniers plissements avaient elles-mêmes participé aux plissements antérieurs, de même que telle ou telle partie des dernières chaînes plissées pourra à son tour se comporter comme une zone solide s'il survient un jour quelque plissement ultérieur. Cette distinction entre zones plissées et plates-formes solides n'en présente pas moins une importance capitale pour toute l'histoire des temps secondaires et tertiaires, bien que, pour l'Europe,

on ne soit pas en droit de l'étendre plus loin dans les temps primaires.

Il faut ajouter que, sur les plates-formes en question, le mouvement relatif dans le sens de la verticale a pu, en dernier lieu, se traduire, soit vers le bas, soit vers le haut : d'où une autre distinction également essentielle, en *aires d'ennoyage* telles que le Bassin de Paris et en *aires continentales*, telles que la Bretagne, le Plateau Central ou l'Ardenne. Mais, souvent, de telles plates-formes, et surtout les aires d'ennoyage actuelles, ont subi, au cours des temps secondaires et tertiaires, une série d'oscillations qui les ont tour à tour transformées en bassins de sédimentation et en continents émergés : ce qui a provoqué une histoire particulièrement compliquée et coupée de lacunes, dont notre Bassin Parisien offre le meilleur type.

Si nous revenons maintenant aux zones de plissement successives, telles qu'elles ont été représentées sur notre carte, nous voyons que, dans notre hémisphère, la consolidation paraît être partie du pôle pour gagner progressivement vers l'Équateur, au nord duquel existait, d'autre part, une seconde ceinture tropicale primitivement consolidée.

Cela revient à dire que les deux premières zones, sur lesquelles l'effet des plissements a rapidement cessé de se manifester, après la phase dite *huronienne*, forment : la première une couronne autour du Pôle Arctique; la seconde un autre anneau entre le Tropique et l'Équateur. Il y a là un certain nombre de pays, tels que la Sibérie, le Canada, le Groënland, la Scandinavie, l'Afrique Centrale, l'Inde et le Brésil, où les chaînes de montagnes sont si anciennes que leurs saillies ont été entièrement

détruites et que le géologue seul peut en reconstituer l'image effacée, comme un archéologue qui relève un monument d'après quelques débris de colonnes épars et le plan des fondations. Là, depuis le précambrien, il ne s'est plus produit que des oscillations verticales sans aucun plissement. La mer a pu revenir ou s'éloigner : ce qui se traduit par des lacunes dans les séries. Mais tous les terrains qu'elle a déposés offrent ce même caractère d'être restés horizontaux et d'avoir à peu près échappé au métamorphisme. On se trouve donc en présence de pays plats, ou de montagnes à formes tabulaires, dont les falaises sont elles-mêmes rayées horizontalement par la succession des strates. Et des terrains très anciens nous y étonnent par leur aspect de fraîcheur qui tient au manque de métamorphisme, souvent aussi par leur richesse en fossiles due à ce que ce métamorphisme n'a pas détruit ces organismes comme ailleurs.

Des caractères géologiques analogues, mais seulement pour les terrains postérieurs au silurien, s'observent dans les tronçons, incomplètement reconnus jusqu'ici, de la chaîne *calédonienne* en Écosse, en Norvège, en Afrique, en Sibérie et en Chine.

Puis vient, concentrique aux deux précédentes, la chaîne dite *hercynienne* ou *varisque*, qui occupe une place capitale dans toute l'Europe Centrale et Méridionale, en France et en Allemagne comme en Espagne, ainsi que dans une grande partie de l'Asie Centrale. Cette chaîne est relativement jeune puisqu'elle remonte au milieu du carbonifère. Néanmoins, topographiquement, elle a eu le temps d'être aplanie par l'érosion, et elle se présente donc à nous sous la forme de pla-

teaux aux faibles ondulations, dans lesquels tous les terrains antérieurs au carbonifère supérieur ou stéphanien et souvent ce stéphanien lui-même ont été plissés, tandis que, à partir du permien, tous les terrains secondaires ou tertiaires dont on rencontre des vestiges sont restés horizontaux.

Mais la jeunesse relative de cette chaîne s'accuse bien par la manière dont elle a participé aux mouvements tertiaires, qui se sont localisés dans sa zone axiale, tout en exerçant, sur le reste de la chaîne, une action de dislocation. En outre, par le fait aussi qu'elle est plus jeune, la chaîne hercynienne ressemble plus aux chaînes tertiaires que les chaînes huroniennes et calédoniennes. La proportion des terrains plissés et non métamorphiques y est plus considérable; les signes de manifestations superficielles ou peu profondes, liées aux plissements carbonifères, ont pu y subsister en grande partie, alors qu'ils ont été, pour la plus grande part, éliminés dans les chaînes plus anciennes. On y retrouve ainsi, en abondance, des indices de volcanisme carbonifère, de même que les nappes de charriage de la même époque y ont été fréquemment conservées.

Ajoutons enfin que cette chaîne hercynienne présente, pour nous, une importance pratique toute particulière, en raison du développement qu'ont pris et gardé, sur toute sa longueur, les formations de combustibles minéraux. Il est probable que les chaînes précédentes avaient elles aussi leurs dépôts de houille; mais le métamorphisme a détruit ceux-ci ou en a fait du graphite. Quant aux combustibles de la chaîne tertiaire, ils sont généralement encore restés à l'état de lignites.

A la chaîne hercynienne, nous rattachons le Plateau de la Meseta Espagnole, le Plateau Breton, le Plateau Central, le Plateau d'Ardenne, le Plateau de Bohême, le Plateau Russe. Sur quelques-uns de ces plateaux, l'attention est attirée par des saillies montagneuses, telles que le Sancy en Auvergne; mais ce sont les effets d'interventions volcaniques postérieures, indépendantes du socle primaire et dues précisément à ces réactions du mouvement alpin sur les massifs hercyniens, auxquels je faisais allusion tout à l'heure.

Enfin, toutes les saillies orographiques actuelles du globe forment un dernier ensemble de plissements particulièrement jeune et particulièrement bien conservé, le système *alpin*, dont l'unité géologique apparaît par ce rapprochement d'âge : les Alpes avec leurs rameaux divergents, tels que les Pyrénées, la Cordillère Bétique, l'Apennin, les Alpes Dinariques, les Balkans, les Carpathes, le Caucase, l'Himalaya, les Andes. Ici les premiers terrains tertiaires eux-mêmes ont été plissés, ce qui permet de dire que ces montagnes leur sont postérieures. Notre figure 10 montre bien comment l'ensemble de ces dernières manifestations occupe en Europe une zone médiane que l'on peut qualifier de mésogéenne, dans l'axe de laquelle se prépare peut-être, par une instabilité souvent désastreuse, une chaîne de plissements future.

En ce qui concerne cette dernière chaîne alpine, un croquis précédent (fig. 4) a mis en évidence ses sinuosités, ses ondulations, ses mouvements de gyration particulièrement complexes. Tout cela peut, je crois, s'expliquer dans la théorie générale que nous avons énoncée précédemment. Si l'on admet que chaque plissement a pour résultat de déterminer des retours en profondeur

ayant pour conséquence un métamorphisme régional, avec des manifestations ignées qui s'accroissent sur ses bords au contact des avant-pays antérieurement consolidés, on comprend bien comment le résultat de chaque plissement nouveau est d'accrocher à ces avant-pays des zones de consolidation nouvelles. Après quoi, ces zones nouvelles font corps avec les zones antérieures, comme la glace prend sur un cours d'eau en partant des rives et gagnant peu à peu vers l'axe de la rivière. Alors, ces parties consolidées, qui n'ont plus assez de souplesse pour se plisser, sont amenées au contraire à se disloquer en tronçons sous l'effet des mouvements ultérieurs et de telles dislocations s'accroissent tout particulièrement dans leurs dernières acquisitions, restées les plus fragiles. Il se forme donc là des tronçons animés de mouvements individuels et parfois contradictoires, dont nous avons en France d'excellents types hercyniens sous la forme de voussoirs solides tels que l'Armorique, le Plateau Central, les Ardennes et les Vosges, avec intercalations d'aires ennoyées, telles que le Bassin de Paris, à caractère profond analogue.

Le jour où de nouveaux plissements ont eu tendance à se produire en arrière de cette zone hercynienne tronçonnée, ils se sont donc trouvés en présence d'une série d'écueils disséminés, qui ont forcé leurs ondulations, leurs vagues, à décrire des courbes, dont l'inflexion des Alpes, ou celle des Carpathes, sont des exemples très nets. Et, en même temps, sur les parties solides de la chaîne intérieure (ici la chaîne hercynienne), on assiste à des dénivellations verticales qui déterminent un jeu de failles en bordure des massifs soulevés, comme autour des pilotis d'un lac quand la glace s'affaisse; tandis que, sur les zones ennoyées où la sédimentation continuait,

un effort de compression latérale a pu arriver à déterminer de faibles ondulations, dirigées dans leur allure par les plissements antérieurs et à peu près conformes avec eux, en sorte qu'on a pu les appeler des plis posthumes.

Sans développer davantage toute cette théorie, nous ajouterons encore un mot sur les phénomènes d'effondrement et de volcanisme que l'on observe surtout, comme on vient de voir, en dehors des zones plissées, sur les massifs solides situés en bordure. Tout se passe, nous l'avons dit, comme si ces massifs solides éclataient et se fendaient sous la compression. Peu à peu, à mesure que la chaîne elle-même se consolide, il semble que ces effondrements, d'abord localisés à sa périphérie, sur la chaîne antérieure, l'atteignent progressivement elle-même. Les types de ces effondrements, dont les proportions nous étonnent souvent, sont ceux de la vallée du Rhin ou de la Limagne, de la Mer Egée, de la Mer Morte, ou, sur une échelle plus vaste, de l'Atlantique et des grands Lacs africains. En Europe, ils sont en principe nord-sud, alors que la direction moyenne des plis est est-ouest, donc orthogonale (voir fig. 4). Ils doivent correspondre à des accidents beaucoup plus brusques, tels qu'il peut s'en produire dans une masse solide, mais dépourvue d'élasticité et susceptible de résister longtemps à l'effort pour se rompre ensuite d'un coup.

A chacun de ces effondrements, qui a dû nécessairement déterminer un déplacement de masses ignées profondes et peut-être une refusion de roches ramenées en profondeur, se lient des épanchements volcaniques avec tous les phénomènes connexes, dont le plus intéressant pour nous est la cristallisation de minerais en profondeur.

CHAPITRE III

L'Histoire des Océans. La Méditerranée, l'Atlantique et le Pacifique.

Le drame légendaire de l'Atlantide a, de tous temps, suscité l'émotion sentimentale des rêveurs et des poètes. Il en est des peuples comme des individus. Une mort lente et précédée d'une longue maladie s'annonce par des progrès insensibles qui familiarisent avec son image et la font paraître moins terrible pour le spectateur. Au contraire, un brusque cataclysme frappe d'une horreur qui se survit, même après que le temps a passé sur la mémoire des hommes son rouleau égaliseur. Notre besoin de tranquillité n'aime pas qu'on lui rappelle la fragilité humaine, la fragilité terrestre, la fragilité de tout ce que nous voudrions croire fixe et inébranlable dans l'univers pour y accrocher un moment notre espoir. Les contemporains égyptiens ou grecs du dernier jour de l'Atlantide, ceux qu'épargna le désastre (s'il eut des hommes pour témoins) sont tous morts, eux aussi, quelques jours plus tard, il y a également des milliers d'années, et nous ne nous intéressons aucunement à eux. Mais qu'en un jour pareil à celui d'aujourd'hui, tout un continent comme le nôtre, avec des villes comme les nôtres, avec des champs comme les nôtres, avec des institutions aux lois gravées sur l'airain, avec des

temples élevés aux dieux éternels, ait pu disparaître soudain dans les profondeurs de l'Océan, c'est ce que nous envisageons avec une sympathie attendrie ! Nous pensons en cela comme des voyageurs qui, le lendemain d'un accident de chemin de fer, passent à côté des locomotives et des wagons renversés, brisés et incendiés, dans un train identique et marchant avec la même vitesse. Si nous étions même plus sérieusement convaincus que le sort de l'Atlantide fut réel et que nous restons exposés à subir demain son pareil, beaucoup d'entre nous seraient peut-être pris de la terreur que l'on attribue aux hommes de l'an 1.000.

Il n'est, cependant, pas pour un géologue, de fait plus normal et plus banal dans l'histoire de la Terre que la disparition d'un continent sous une mer. Mais de tels événements n'intéressent, en général, que les géologues. Celui-ci frappe davantage l'imagination parce qu'il dut se produire brusquement et surtout parce qu'il a englouti sans doute des milliers d'hommes.

Je voudrais, dans ce chapitre, résumer les idées récentes sur les mouvements du sol qui ont plus ou moins anciennement amené les flots marins sur l'emplacement des trois grandes mers actuelles, la Méditerranée, l'Atlantique et le Pacifique. Combien, au cours de ce récit, nous allons rencontrer d'Atlantides ignorées ou dédaignées par notre indifférence !...

Chacun sait le rôle considérable que jouent les mers à la surface de la Terre. Elles occupent les deux tiers de la superficie. Leur volume est treize fois celui des masses continentales ; leur profondeur est en moyenne de 3.500 mètres et atteint localement près de 10.000 mètres. Cependant l'histoire de ces mers, si importante pour

un géologue, nous est, jusqu'ici, très peu et très inégalement connue, et cela d'autant moins que la mer envisagée est plus large, qu'elle interrompt davantage, par sa direction, la continuité des observations terrestres. Pour découvrir, en ce qui concerne ces mers, les traces du passé, nous commençons par interroger avidement les terrains des rivages et des îles; nous demandons à leur faune et à leur flore, anciennes ou présentes, de nous révéler des communications disparues ou des barrières tombées; nous procédons aussi par comparaison avec l'histoire géologique des continents voisins; enfin, nous avons la ressource, encore peu utilisée, d'explorer directement le fond des océans ou de chercher, comme nous le verrons, dans les mesures de la gravité en pleine mer, un moyen encore très hypothétique de déceler des roches lourdes ou légères. Tout cela laisse place à bien de l'inconnu.

La comparaison avec la géologie continentale est peut-être, jusqu'à nouvel ordre, notre instrument le plus utile.

Sur les mers anciennes qui ont disparu en tant que mers, étant redevenues des continents, la géologie a le moyen de fouiller profondément et d'acquérir chaque jour de la précision. On peut faire la dissection anatomique d'un cadavre. Mais on doit ensuite se contenter, pour un vivant, d'un diagnostic, qui se fonde en grande partie sur le souvenir des autopsies précédentes. C'est ainsi que l'histoire des mers abandonnées par les eaux nous instruit sur ce que nous cachent les flots dans les mers vivantes. Or, en poursuivant la même comparaison, les chirurgiens pénètrent chaque jour plus hardiment avec leur scalpel dans la profondeur des tissus vivants.

Et l'océanographie commence également à vouloir esquisser la géologie sous-marine.

Cette étude géologique des océans, encore à peine ébauchée, demeure, cependant, embryonnaire. Pour être plus complète, elle entraînerait de grosses dépenses, avec des difficultés techniques que l'on arrive à lever lorsqu'on le veut bien. Mais les gouvernements ont toujours été peu disposés à des dépenses qui ne promettent pas, dans un avenir rapproché, la compensation de quelque bénéfice pratique et dont le seul résultat visible est de satisfaire un instant notre soif de savoir. Quelques-uns des plus précieux résultats acquis sur le fond des océans ont été dus accidentellement à des projets de tunnel ou de pont, à des poses de câbles télégraphiques sous-marins, à des sondages ayant eu pour but de préserver les navigateurs contre la rencontre de bas-fonds inconnus ou d'écueils. Pour qu'on se mît, avec l'activité nécessaire, à dresser la carte géologique sous-marine attendue des savants, il faudrait que l'on envisageât la possibilité de rencontrer et d'exploiter sous la mer des richesses minérales utiles, ou tout au moins que l'on entrevît dans ce travail la possibilité d'accroître notre connaissance des continents eux-mêmes et notre chance d'y trouver quelques précieux minéraux, tels que la houille ou le pétrole.

Ce jour-là, peut-être dressera-t-on une carte géologique des fonds marins analogue à celle de nos continents, en y négligeant, comme on le fait sur celle-ci, les dépôts de recouvrement actuels qui masquent les terrains à proprement parler géologiques, c'est-à-dire en procédant par des sondages dont on accroîtra progressivement la profondeur dans certains cas utiles. En atten-

dant, nos seuls moyens de nous renseigner directement sur le fond des mers sont les cartes bathymétriques (bien imparfaites encore, malgré leurs airs de précision, dès qu'on arrive au large), ou les échantillons ramenés par dragues, par le relevage des câbles, et par les prélèvements opérés dans des opérations qui ont pour objet essentiel la mesure des profondeurs marines.

Ces divers procédés nous permettent déjà de rectifier certaines idées qui ont eu longtemps cours dans la science, notamment sur deux questions connexes, la possibilité de brusques effondrements et la généralité des abrasions marines.

Après l'époque où l'on abusait des cataclysmes, nous en avons connu une autre où il était à peu près défendu d'en parler. On prétendait supprimer de l'histoire toute discontinuité; on n'admettait que des mouvements lents, presque insensibles et des évolutions progressives. La notion de discontinuité a, comme je le rappelais déjà précédemment, reconquis droit de cité dans toutes les sciences et, de même que l'on admet des points critiques en physique ou des saltations en botanique, on ne craint plus aujourd'hui d'envisager des effondrements en géologie. Ce qui ne signifie pas, bien entendu, que tous les effondrements dont il a pu être un moment question aient été réels. Mais il a fallu constater, après l'avoir vivement nié, que les tremblements de terre étaient susceptibles de provoquer des failles, des dénivellations instantanées, que des îles pouvaient en quelques heures émerger ou s'engloutir. Et, quant aux dimensions attribuables parfois à de tels phénomènes, elles ne nous semblent grandes que parce que nous sommes petits...

La théorie de l'abrasion marine se rattache à celle des effondrements. A l'époque où on ne voulait pas envisager d'effondrement, on admettait aussi que tout retour de la mer sur un continent, toute transgression marine avait été précédée d'une lente abrasion ayant entièrement aplani celui-ci, de manière que les premiers sédiments eux-mêmes avaient pu s'y déposer horizontalement. On croyait en trouver la preuve dans la manière dont se présentent souvent les anciennes transgressions marines sur les coupes géologiques : par exemple, le crétacé sur le primaire dans le nord de la France, ou le jurassique sur le silurien en Normandie. En effet, l'abrasion a certainement opéré par coups de rabot sur nombre d'anciens continents alternativement recouverts par les eaux et ramenés au jour. Il est toutefois impossible de généraliser l'idée pour les mers actuelles, sans admettre en même temps, comme on l'a fait parfois, que ces mers représentent d'anciens traits immuables de l'orographie terrestre et que les conditions y ont toujours été différentes de celles que l'on observe sur les continents voisins. La plupart des océans accusent des reliefs très inégaux et de brusques surrections d'îles accolées avec de non moins brusques dépressions : par conséquent, tout le contraire d'un fond aplani, ou du moins ramené à une pente régulière. La vérité me paraît être que le fond des mers a dû subir des mouvements identiques à ceux des continents, être plissé et disloqué comme eux, prendre par endroits à l'air libre un relief montagneux ou volcanique, puis s'enfoncer pendant un stade quelconque de l'érosion, parfois quand elle avait produit tout son effet, ailleurs avant qu'elle eût eu le temps d'atténuer les reliefs orogéniques. Si nous voyons une différence si

forte entre les mers et les continents, c'est que nous observons les premiers dans une phase négative de submersion, les autres dans une phase positive d'émergence. Il y a bien des chances pour qu'émergence des uns et submersion des autres se fassent compensation. Un géologue de l'époque crétacée, s'il en avait existé, aurait peut-être, au contraire, soutenu l'immuabilité du caractère océanique sur le continent européen. Supposons les Alpes englouties demain, quoiqu'elles ne soient plus toutes jeunes au sens géologique du mot, elles pourront garder leur relief sous-marin. Supposons inversement la côte orientale du Pacifique ramenée à la lumière, dès que les pluies l'auront lavée du léger manteau sédimentaire qui en aplanit les rugosités sous-marines, elle reprendra presque un relief alpestre.

L'examen de quelques mers concourt à nous faire rejeter ce que la vieille théorie d'une générale abrasion marine offrait de trop absolu. Les unes, comme la Manche ou les fiords norvégiens, sont de simples vallées d'érosion submergées. D'autres, comme la Méditerranée ou la ceinture du Pacifique, sont en relation directe avec des plissements, ayant eu un dernier contre-coup récent; d'autres encore, comme l'Atlantique, accusent de vastes affaissements ayant brusquement coupé la direction générale des plis à l'emporte-pièce; et, dans le cœur même du Pacifique, nous croirons trouver l'écho et le prolongement de tels effondrements.

Commençons par la *Méditerranée*. Bien vieille est l'existence de cette « Mésogée » (pour employer la traduction grecque que les géologues adoptent souvent afin de ne pas se borner à la mer actuelle et en donnant à la notion de « mer située au milieu des terres » une

plus grande généralité). La Mésogée a été autrefois beaucoup plus large et aussi plus étendue en direction qu'elle n'est aujourd'hui. En largeur, elle a embrassé tout au moins ce qui forme pour nous les Alpes et le Bassin de Vienne. En direction, on peut, avec un peu de bonne volonté, la suivre : d'un côté, jusqu'au golfe du Mexique; de l'autre, jusqu'au Pacifique. Ce qui en reste n'est que le témoin déchu d'une ancienne gloire. Mais toujours cette mer a offert le même caractère d'être parallèle à la direction moyenne des plissements européens et d'en épouser l'allure d'ensemble, sauf à fluctuer suivant les époques au nord et au sud et sauf à manifester avec une intensité spéciale les effets d'une compression qui, sans cesse, l'a refoulée transversalement à son axe. J'ai essayé ailleurs de raconter cette histoire et je ne veux y revenir que pour en marquer quelques grandes étapes (1).

Dès le début du primaire apparaît le long et large sillon est-ouest qui, pendant bien longtemps, se développera sur les trois quarts de la circonférence terrestre. Durant tout le secondaire, il y a là une mer chaude, d'où essaient au loin des faunes : mer établissant un fossé entre des masses continentales dont l'évolution se poursuit dans des conditions différentes (2).

Avec le tertiaire, la géographie de cette Mésogée se particularise : surtout à partir du moment où se manifestent au jour les rides alpestres. Au début, pendant

(1) *Histoire de la Terre*, p. 220. — *Science géologique*, p. 455.

(2) Paul Lemoine a donné une carte des principaux gisements jurassiques, crétacés et tertiaires sur le pourtour de l'Océan Indien en y joignant le tracé des régions géosynclinales d'après Émile Haug (*Études géologiques dans le Nord de Madagascar*, 1906; reproduit dans *Suess III*, 1607).

l'éocène, à un moment où Paris était submergé par une mer qui porte son nom, la mer lutétienne, la Méditerranée était encore énorme. Elle couvrait l'Andalousie, le Bassin de la Garonne, l'Italie, la Grèce, le Bassin de Vienne, la Roumanie, tout le sud de la Russie, la Turquie et la Perse. Vers l'ouest, elle devait s'étendre, par les Açores, jusqu'au golfe du Mexique et à Panama; car, sur son parcours présumé, on retrouve partout, dans des terrains marins de cet âge, une faune de mollusques méditerranéenne.

Mais bientôt les rides montagneuses alpestres commencent à surgir et à refouler les eaux marines. Nous assistons nettement au phénomène en Europe, nous le soupçonnons plus loin à travers l'Atlantique. Une première époque de destruction donne les matériaux de démantèlement qu'on appelle le flysch (oligocène); une seconde produit les dépôts d'évaporation salins dits du schlier (helvétien, tortonien). A ce moment, la mer doit, à la fois, se réduire en largeur et se tronçonner. Ce que nous disions plus haut pour la faune des mollusques dans le continent Atlantique cesse maintenant d'être vrai. A la Trinidad, où la série marine avait été continue du lutétien au burdigalien, elle s'interrompt ensuite. La communication entre la Méditerranée et le domaine Atlantique se ferme le long du Guadalquivir après le tortonien et n'existe pas encore à ce moment par Gibraltar.

Voici venir une phase (dite sarmatienne), où la Méditerranée a presque totalement disparu dans le domaine qu'elle occupe aujourd'hui. Alors, on aurait pu sans doute aller à pied sec de Gênes à Tunis, de la Macédoine en Crète.

Mais l'action appelle la réaction. Les êtres vivants

terrestres, qui avaient pu s'établir sur ce continent nouveau, étaient destinés à subir un désastre analogue à celui que nous symbolisons par le nom de l'Atlantide. Soudain, avec le pliocène, la barrière montagneuse de Gibraltar s'affaisse et cède. Le fond méditerranéen s'engloutit; des eaux froides venues de l'Atlantique l'envahissent. Des effondrements successifs tronçonnent ce vaste domaine, effondrements dont les derniers ont englouti, aux deux extrémités : d'une part le continent Egéen, à l'exception de ses îles; d'autre part l'Atlantide, qui fait place désormais à une mer indépendante de la Méditerranée, une mer de direction nord-sud. Ainsi la Méditerranée prend à peu près son allure actuelle et l'équilibre tend à s'établir.

Depuis quand l'état de choses qui nous est familier existe-t-il, c'est tout le point discuté dans l'histoire légendaire de l'Atlantide. On a, un moment, sur la foi d'interprétations inexactes, rajeuni les derniers déplacements de la mer dans la Méditerranée pour les croire contemporains des temps historiques. Diverses observations récentes, notamment celles de M. Cayeux à Délos, sont contraires à cette idée. Le niveau marin paraît s'être peu déplacé ici depuis que les hommes ont une histoire. L'a-t-il fait auparavant pendant les quelques milliers d'années où il existait déjà des hommes qui ne nous ont pas laissé d'annales, ou bien les derniers effondrements de l'Atlantide sont-ils antérieurs à l'homme, c'est le point sur lequel on n'est pas encore fixé et que nous examinerons tout à l'heure à propos de l'Océan Atlantique. En tous cas, ne concevons pas trop d'illusions sur l'avenir de notre Méditerranée. La localisation des mouvements sismiques et des manifestations

volcaniques y accuse la persistance d'une zone fragile et instable, sur laquelle on peut s'attendre encore à des mouvements futurs.

J'ai laissé de côté, dans tout ceci, l'hypothèse (avancée par quelques géologues) d'une Méditerranée Pacifique, que jalonnaient les fosses marines allant de Java vers Hawaï et les Marquises (fig. 12) et qui pourrait compléter un grand cercle terrestre en rejoignant le golfe du Mexique. Nous aurons à revenir dans un instant sur cette question du Pacifique.

Prenons maintenant, à titre de second exemple caractéristique, le cas de l'*Atlantique* (fig. 11). Cet océan a, comme on le sait, une direction générale nord-sud, avec des sinuosités dessinant un S autour du méridien. C'est, dans son ensemble, une fosse perpendiculaire à la Mésogée; et, comme pour celle-ci, on croit pouvoir en suivre la trace sur toute la longueur d'un méridien, celui de Greenwich. Mais, tandis que la direction mésogéenne est certainement fort ancienne, celle de l'Atlantique nous apparaît comme récente. La Méditerranée a suivi les plis hercyniens de l'époque carbonifère; l'Atlantique les recoupe à angle droit.

Cette allure nord-sud de l'Atlantique se retrouve très curieusement marquée dans une longue crête sail-lante, une crête généralement sous-marine, qui occupe à peu près son axe à égale distance entre l'ancien continent et le nouveau (Tristan-da-Cunha, l'Ascension, les Açores et l'Islande); et, le long de cet axe, s'accu-mulent des phénomènes volcaniques qui sont générale-ment absents sur les deux rives de cet océan, sauf à la traversée de la Mésogée vers le 15^e degré nord (Antilles d'une part; îles du Cap-Vert de l'autre).

Fait bien remarquable : de même que nous avons suivi tout à l'heure la Mésogée ancienne loin au delà de ses limites actuelles, nous pouvons suivre la fosse Atlantique orientale, d'abord jusqu'au Pôle Nord où elle est marquée par les profondes dépressions rencontrées dans l'expédition de Nansen. Après quoi, toujours le long du même méridien, il semble qu'on en retrouve des indices dans le Pacifique, où elle est particulièrement nette à la Nouvelle-Zélande, mais où quelques fosses de 6.000 mètres semblent la marquer plus au nord depuis l'Équateur (1). Et, enfin, il n'est pas impossible qu'elle traverse l'Antarctide si, comme semblent l'indiquer quelques explorations récentes, ce vaste continent montagneux est coupé en deux parties distinctes par un sillon marin aboutissant à la mer de Ross. S'il en était ainsi, le cercle se fermerait, plus nettement encore que celui de la Mésogée, avec la différence qu'il s'agit ici d'une mer actuelle et non d'une mer ayant perdu sa continuité apparente depuis le début du tertiaire.

Le sillon Atlantique ressemble donc un peu, par son développement, au sillon mésogéen. Mais il s'en distingue bien plus encore par d'autres caractères essentiels, par son âge récent et par la manière dont il coupe transversalement, en Europe ou en Amérique du Nord, les massifs primaires des chaînes hercyniennes (Grande-Bretagne, Armorique, Meseta Espagnole, Meseta Marocaine, etc...). Partout ces zones de terrains plissés à l'époque carbonifère sont, nous l'avons dit, recoupés transversalement par le rivage, qui figure une brusque

(1) Voir la figure 12, p. 88.

cassure, le contact par dislocation de deux systèmes orogéniques orthogonaux.

Une disposition différente, mais qu'il est permis d'attribuer à la même cause profonde, s'observe à la rencontre des plis tertiaires avec l'Atlantique. Dans deux régions européennes au moins, dans la chaîne cantabrique comme à Gibraltar et de même, en Amérique, dans les Antilles, on voit ceux-ci décrire, sur le bord de l'Atlantique, une courbe plus ou moins complète, ainsi que cela se produit pour ces plis tertiaires toutes les fois qu'ils sont venus s'écraser contre un massif hercynien préexistant. Peut-être, il est vrai, aperçoit-on aussi parfois, notamment au sud du Portugal, des amorces de plis tertiaires qui s'insinueraient, en gardant la direction est-ouest, entre deux fragments de ce massif hercynien disjoint. Il est probable, en effet, que, sur le trajet Atlantique de la Mésogée, depuis Gibraltar jusqu'au Mexique, certaines parties du sol sous-marin ont dû subir le prolongement des plis tertiaires et les bords de cette chaîne tertiaire submergée paraissent accuser une exagération des phénomènes volcaniques. Finalement, on arrive à l'idée que l'Atlantique reproduit, dans une certaine mesure, sous les flots, ce que nous observons à la surface des deux continents séparée par elle : existence, au nord et au sud, de deux massifs anciens comparables à ce que sont, d'une part, les « boucliers » canadien et scandinave; de l'autre, les massifs du Brésil et de l'Afrique; entre les deux, sur le passage de la zone méditerranéenne, plis tertiaires raccordant les Alpes avec la Cordillère des Antilles. Et cela aussi concorde avec l'âge récent que nous attribuons à l'Atlantique. Une partie de cette chaîne mésogéenne est seule-

ment ennoyée, tant par une différence de niveau possible dès l'origine dans la hauteur absolue des plissements que par des effondrements postérieurs, dont le tracé peut être jalonné par des manifestations volcaniques.

Si, maintenant, au lieu de se borner à l'allure présente de l'Atlantique, on recherche sa disposition passée, on est confirmé dans l'idée que la prédominance actuelle des accidents nord-sud a dû seulement se manifester depuis le tertiaire et qu'antérieurement l'Atlantique participait, au contraire, comme l'Europe ou le nord de l'Afrique, aux accidents est-ouest, qui établissaient alors un raccord entre les deux continents.

Il ne faut pas remonter bien loin dans la paléogéographie pour trouver, comme je l'ai rappelé plus haut, deux grands continents allongés suivant des parallèles et séparés par la Mésogée : l'un qui reliait l'Europe à l'Amérique du Nord et que devait border une chaîne de montagnes au sud; l'autre qui rattachait l'Afrique Australe au Brésil comme à l'Inde (le continent dit du Gondwana).

Vers le sud, les deux saillies opposées du Brésil et de l'Afrique ont été certainement reliées très longtemps par un pont terrestre. Enfin, le continent antarctique s'étendait beaucoup plus loin au nord qu'il ne le fait aujourd'hui, reliant la Tasmanie et la Terre de Feu avec les îles situées pour nous au sud de l'Afrique.

La région où nous rencontrons des indices d'un sillon marin jurassique et créacé dans ce qui est aujourd'hui notre Atlantique, appartient uniquement à la Mésogée. Là, sur une zone particulièrement instable de l'écorce terrestre, on observe qu'il s'est produit des mouvements

de bascule localisés. Au milieu du crétacé, pendant le cénomanien, nous constatons, par exemple, que les Canaries formaient le rivage d'une mer, dont on y observe les dépôts littoraux. Plus tard, nous voyons que certaines parties ont subi un relèvement (miocène marin porté à 410 mètres à Madère), tandis que des régions voisines se trouvaient englouties sous des abîmes de 3 et 4.000 mètres. C'est en raison de faits semblables que Suess a pu déclarer inadmissible l'existence d'un continent Atlantique à l'époque tertiaire depuis les Açores jusqu'au Vénézuéla : conclusion qu'il faudrait se garder de généraliser au sud ou au nord. En dehors de cette zone est-ouest limitée en largeur, des preuves militent en faveur de masses continentales récemment morcelées. Vers le sud, où nous sommes réduits à glaner des renseignements bien fragmentaires, quelques dépôts marins d'âge albien sur les côtes du Brésil ou de l'Afrique sud-occidentale prouvent seuls des introductions de la mer crétacée transversalement au continent du Gondwana.

Puis, quand les mouvements alpins se produisent à partir de l'oligocène, l'Atlantique en subit le contre-coup, tout au moins sous la forme de fractures, peut-être aussi par la production de plissements tectoniques. Il est fort décourageant de chercher à préciser dans l'état actuel de nos connaissances. Pour arriver à localiser et à dater un peu ce qui s'est produit depuis lors dans ce vaste espace aujourd'hui occupé par les eaux, il faudrait faire de la géologie en scaphandre avec l'aide de quelque capitaine Nemo, aller au large des Canaries et des Açores observer sous la mer les terrains, leurs phases de sédimentation marine, leurs lacunes et leurs plissements. Nous sommes, jusqu'ici, très incomplète-

ment renseignés par des observations limitées à quelques îles, elles-mêmes perdues au milieu de l'Océan.

Cependant, voici ce que nous croyons apercevoir en allant du nord au sud. Tout d'abord, sur un vaste espace septentrional allant de l'Islande aux Faeroer et au Groenland et qui, aujourd'hui encore, ne plonge qu'à une faible profondeur sous les eaux, il a dû subsister, à l'époque tertiaire, un continent où vivaient en abondance des plantes terrestres ayant souvent donné lieu à des dépôts ligniteux intercalés au milieu d'abondantes coulées volcaniques. Même à l'époque miocène, pour retrouver de ces côtés des sédiments marins, il faut aller au nord de ce continent jusqu'au Spitzberg et, chose singulière, la faune marine qu'on y observe alors est une faune à affinités méditerranéennes. Puis, en face des côtes françaises, j'ai rappelé ailleurs comment, dans le golfe de Gascogne, la si curieuse fosse de Cap-Breton paraît avoir été déjà creusée dès l'époque helvétique (1). Devant les côtes espagnoles, un sillon du même genre a pu être tracé également de bonne heure en face du Guadalquivir, prédécesseur septentrional du fossé marin que forme maintenant le détroit de Gibraltar.

La zone volcanique des Açores, de Madère et du Cap-Vert paraît avoir été, pendant le tertiaire et jusqu'à une époque très récente, l'objet de bouleversements intenses qui ont provoqué les grandes différences de relief aujourd'hui constatées, ces fosses de 6.000 mètres et plus voisinant avec les montagnes de Madère, ces pentes escarpées de roches volcaniques à nu qu'ont fait reconnaître les travaux relatifs aux câbles sous-marins. Là, plus

(1) *Géologie de la France*, p. 289.

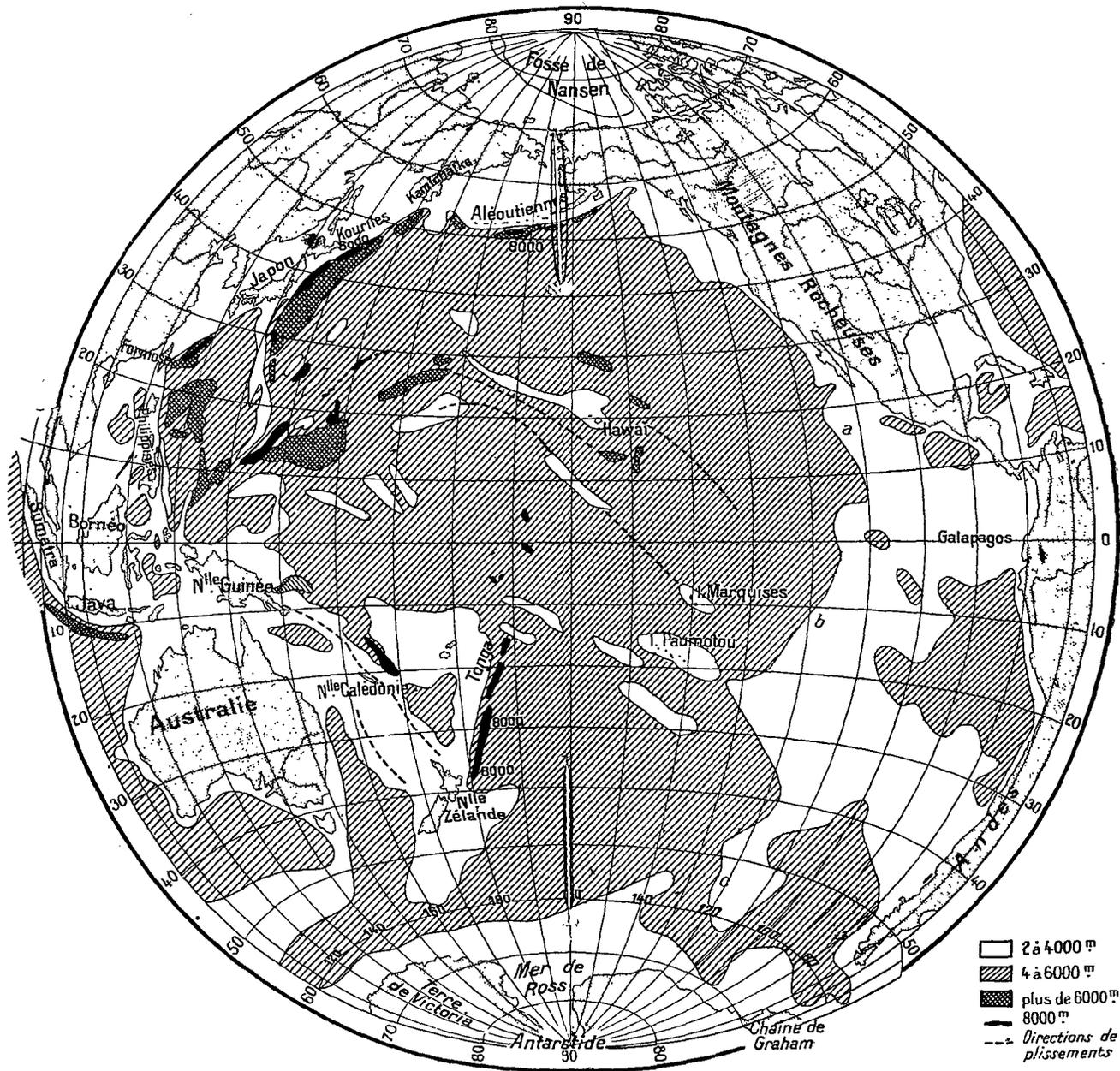


FIG. 12. — Carte des profondeurs marines du Pacifique.

que partout, il est impossible de préciser, de même qu'un géologue resterait paralysé s'il prétendait établir la géologie des Carpathes après une submersion qui, épargnant quelques sommets, aurait envahi tout l'espace compris entre la Bohême, la Silésie et la Transylvanie. Il y a peut-être eu dans cette région des plissements, puisqu'on en constate sur la côte marocaine, où le plaisancien même (fin du pliocène) a été plissé par des mouvements quaternaires. Mais, d'une façon générale, ce qui a évidemment dominé, ce sont les effondrements partiels avec dislocations donnant lieu à des épanchements volcaniques. De là, toutes ces différences de relief dont l'origine est récente. Voici, à 900 kilomètres au nord des Açores, à peu près sur le parallèle de Nantes, un point où les grappins ont arraché des débris de roches volcaniques vitreuses ayant, comme l'a remarqué M. Terrier, nécessairement dû se consolider à l'air libre sous la pression atmosphérique; et ces roches, d'âge quaternaire, se cachent aujourd'hui dans un abîme de 3.000 mètres à relief abrupt. Voici, par contre, à Santa-Maria, la plus méridionale des Açores, des sédiments miocènes à faune franchement méditerranéenne qui apparaissent aujourd'hui au-dessus de la mer sans avoir été plissés dans cette remontée. Pas de plis non plus, ce semble, dans le miocène de Las Palmas (Grande-Canarie), qui forme une terrasse en pente douce recoupée par une falaise de 80 mètres, ni dans le miocène de Madère porté à 410 mètres au-dessus de la mer actuelle, également sans plissement. Indépendamment de tous les volcans qui percent le niveau des mers dans l'Atlantique, il en existe de sous-marins, dont un rencontré en 1838 à l'Équateur sur la ligne joignant l'Ascension au Cap-Vert, etc...

De tels faits démontrent assez que de grandes parties de l'Atlantide se sont comportées, à la fin du tertiaire, comme des fragments de massifs hercyniens soumis, sans flexion, à des déplacements verticaux de large amplitude, à de simples dislocations, en général exclusives de plis. Il est possible qu'il s'y soit joint des plissements localisés, comme ceux qui semblent s'amorcer, nous l'avons dit, avec une direction est-ouest, au sud du Portugal, ou comme ceux que nous avons également signalés le long du Maroc : plis dont les alignements est-ouest des Açores pourraient marquer la continuation. Tout cela est assez vague, mais suffit néanmoins pour justifier la conviction récemment exprimée par M. Termier que les récits fameux de Platon sur l'engloutissement de l'Atlantide pouvaient correspondre à un événement réel dont une très primitive humanité aurait gardé la mémoire. Abandonnons donc un instant la géologie qui nous a dit ce qu'elle savait, pour chercher, dans les récits transmis aux Grecs par les Égyptiens leurs maîtres, la part de vérité scientifique qu'ils peuvent contenir.

Voici, d'abord, dans les récits du philosophe grec, les traits les plus caractéristiques. Ils ont été reproduits deux fois par lui dans le *Timée* et dans le dialogue de *Critias* qui lui fait suite. Platon y parle d'un récit que des prêtres égyptiens auraient fait à Solon (remarquons qu'entre Solon et Platon il s'est écoulé près de deux siècles : Solon né en 640, mort en 558; Platon né en 429). On y parle d'une grande île qui aurait existé au delà des colonnes d'Hercule, « île plus grande que la Lybie et que l'Asie », séparée du continent par une chaîne d'autres îles. Cette Atlantide aux falaises abruptes compre-

naît une ville magnifique dans une plaine entourée de montagnes aux riches et populeux villages. Là régnaient des souverains puissants dont l'empire s'étendait jusqu'à l'Égypte et l'Italie. Un jour, une armée formidable partit de là pour conquérir la Grèce, comme, 9.000 ans plus tard, devaient le faire les Perses en sens inverse, et Athènes, prenant la tête de la confédération grecque, en fut victorieuse comme des Perses. « *Plus tard*, de grands tremblements de terre et des inondations engloutirent, en un seul jour et en une nuit fatale, tout ce qu'il y avait *chez vous* (Athéniens) de guerriers. L'île Atlantide disparut sous la mer. Depuis ce temps, la mer, dans ces parages, est devenue impraticable aux navigateurs; les vaisseaux n'y peuvent passer *à cause des limons* qui s'étendent sur l'emplacement de l'île abîmée. »

J'ai souligné consciencieusement quelques mots un peu gênants pour qui veut donner à cet événement une couleur géologique. Tel est surtout le passage relatif aux limons, alors que les fonds de mer sur l'emplacement de l'Atlantide présumée, dépassent en moyenne 3.000 mètres (aussi M. Termier interprète-t-il ces limons par écueils). On s'explique mal aussi le « *chez vous* » (en Attique), pour lequel le même savant imagine un ras de marée, suite de l'engloutissement, ayant gagné de l'Atlantide jusqu'à Athènes : d'autant que Platon, quelques lignes plus haut, nous dépeint la destruction de l'armée ennemie « par Athènes » comme ayant été antérieure.

Ajoutons que, s'il faut aller chercher l'Atlantide par delà des Açores, vers le point où nous venons de dire que les sondages semblent démontrer l'engloutissement

récent d'un pays volcanique, c'est environ 1.500 kilomètres à franchir depuis le détroit de Gibraltar, la moitié de la traversée jusqu'à Terre-Neuve.

D'autre part, si on replace le récit sur l'Atlantide dans son cadre platonicien, on ne peut manquer d'être frappé par l'abondance et la précision suspecte des détails fictifs qui s'y superposent à un souvenir peut-être réel. Le Timée, en tête duquel nous rencontrons un premier récit du cataclysme, c'est une Théodicée, un *de Natura rerum*, où Platon a la prétention d'expliquer toute la formation de l'univers, de la nature et des êtres vivants. On y oublie longtemps l'Atlantide parmi ces hypothèses philosophiques et métaphysiques pour la retrouver seulement dans le Critias, où se place une longue, très longue description de ce pays, voué à Neptune comme Athènes l'était à Minerve (1). Tout y est décrit en détail, trop en détail à 9.000 ans de distance : la dimension des plaines, des canaux et des temples, les colonnes d'orichalque, les éléphants, les murailles recouvertes d'airain, d'étain et d'or, les bassins pour les bains, l'hippodrome, le système législatif, les cérémonies religieuses, etc. (2). Et, quand nous arrivons au bout du manuscrit, brusquement coupé par une lacune, nous nous apercevons qu'il s'est agi d'opposer au gouvernement idéal et mythique des premiers Athéniens, la perversion des Atlantes,

(1) P 259 à 274 de la traduction Victor Cousin.

(2) Quelques traits rappellent curieusement le Mexique primitif comme si les Grecs avaient un moment connu l'Amérique, pour perdre ensuite tout rapport avec elle et la supposer engloutie : par exemple, la disposition de la ville entourée de fossés sur lesquels on avait jeté des ponts, la position du palais dans une île (p. 264), l'abondance de l'or et même la limitation du pays au-dessus de la mer par une grande falaise (p. 268), le cordon d'îles comme aux Antilles.

d'abord merveilleusement vertueux, puis dépravés comme des anges déchus. Le déluge qui les engloutit, un des nombreux déluges connus par les Égyptiens, devient ainsi proche parent de celui auquel échappèrent Deucalion et Pyrrha, ou des malheurs qui frappèrent Sodome et Gomorrhe. Combien d'îles dans la Mer Egée étaient de même, dans l'Antiquité, supposées nées de la mer, et menacées d'être ensuite englouties par la colère de Neptune !... Ce n'est pas une raison pour que Platon n'ait pas utilisé le souvenir très vague d'un fait géologique comme un cadre réel qui lui permettait d'exposer ses conceptions du gouvernement (à la façon de Rabelais, Fénelon ou tant d'autres) en les plaçant dans un pays qui n'était pas tout à fait imaginaire. Mais ne nous montrons pas trop impatients de conclure avec certitude et bornons-nous à regarder comme scientifiquement très admissible ce poétique sujet de rêves !...

Et maintenant prenons un dernier exemple, celui du *Pacifique*, où nous allons, je crois, retrouver, avec des caractères très particuliers, la superposition d'un effondrement récent comme celui de l'Atlantique sur un système de plissements ayant pu comprendre une Méditerranée ancienne (fig. 12).

L'allure générale de cette vaste mer présente, au premier abord, un contraste bien connu avec celle de l'Atlantique. Ici, les saillies orographiques et les zones géologiques, au lieu d'être coupées à l'emporte-pièce par le rivage de l'Océan, lui sont en général parallèles et dessinent, autour de lui, des guirlandes d'îles, que jalonnent d'innombrables volcans et que bordent immédiatement de très profondes dépressions marines. La principale zone instable de l'Atlantique occupe son axe; celle du

Pacifique décrit sa circonférence (ce qui n'empêche pas, d'ailleurs, des volcans de reparaitre au centre). Enfin, l'existence habituelle de séries sédimentaires marines très complètes sur la périphérie de cet océan montre qu'une fosse marine en a anciennement fait le tour : que le dessin du Pacifique, en un mot, remonte très loin.

Si donc on se bornait à cette ceinture continentale et insulaire, qui est particulièrement bien connue puisqu'elle émerge en des pays très habités et explorés, on serait amené à considérer le Pacifique comme une Mésogée circulaire dont les Alpes s'appelleraient les Andes, les Montagnes Rocheuses ou le Japon, et dont le sillon marin, représenté par les fosses profondes qui suivent cette saillie, contournerait tout un arrière-pays submergé.

Mais il ne faut pas en conclure trop vite, comme on l'a fait souvent, que tout le cœur du Pacifique constitue, dans son ensemble, une zone à l'histoire très simple, ayant été occupée par la mer depuis l'origine des temps géologiques (1). Je serais beaucoup plus porté à distinguer, dans une certaine mesure, le Pacifique central de sa ceinture plissée et à considérer le premier comme formant le pendant et la contre-partie de ce qui peut se passer sur notre continent, avec des complications analogues. Si un mouvement d'ascension générale, peut-être destiné à se réaliser un jour, se produisait demain dans tout le domaine Pacifique, on y verrait sans doute apparaître au jour côte à côte des massifs primaires, des chaînes de plissement tertiaires

(1) Voir ROBERT DOUVILLÉ, *L'histoire du Pacifique* (*la Nature*, 20 mai 1911).

avec leurs phénomènes de charriage et des compartiments effondrés, exactement comme en Europe, en Asie ou en Afrique, tandis qu'alors les flots, chassés du Pacifique par cette émerision, viendraient réaliser en Europe une vaste transgression, analogue à celles que nous y connaissons dans le passé géologique (dévonien moyen, supracrétacé, etc.) et le recouvriraient d'une mer Pacifique, dans laquelle les sommets des Alpes ou des Pyrénées formeraient des îles.

Dans cette hypothèse, la ceinture du Pacifique étant une Mésogée aux plissements esquissés de bonne heure et récemment accentués en saillie, le reste serait comparable à un bouclier ancien, d'abord enveloppé de premiers plis hercyniens, puis probablement replissé à l'époque tertiaire et disloqué, effondré par tronçons à la manière de l'Atlantique. Peut-être aurait-on l'explication de ce très ancien dessin circulaire si on pouvait dépouiller notre Terre de ses sédiments et de ses mers pour retrouver les inégalités profondes de sa croûte scoriacée comme on le fait pour la Lune (1). L'histoire ultérieure de cette zone instable comporterait ensuite, comme pour la Mésogée, son resserrement progressif sous un effort de compression et, en dernier lieu, la surrection d'une chaîne montagneuse, bordée par une fosse marine à effondrements récents. La chaîne de Graham dans l'Antarctide, les Andes, les Montagnes Rocheuses, les Aléoutiennes, les Kouriles, le Japon, les charriages probables de la Nouvelle-Calédonie, la Nouvelle-Zélande, etc., représenteraient la ceinture alpestre de cette Méditerranée Pacifique, dont l'avant-

(1) Voir, plus loin, p. 127.

pays extérieur serait constitué par l'Amérique du Nord, le Plateau Brésilien, l'Australie, la Sibérie, etc...

Laissons de côté cet avant-pays et la chaîne plissée dont la disposition est relativement claire; les énigmes se posent pour toute la vaste zone marine du Pacifique proprement dit, avec sa poussière d'îles où n'apparaissent guère que des roches volcaniques et des récifs coralliens. C'est le domaine que nous assimilons tout à l'heure à un arrière-pays fracturé, dénivelé par voussoirs et localement effondré, avec production de volcans le long des fosses, tandis que d'autres géologues y voient un des traits les plus vieux et les plus permanents de la planète.

Parmi les arguments en faveur de notre théorie, on peut remarquer que, zoologiquement, botaniquement, un continent Pacifique est tout au moins bien commode pour expliquer l'origine et l'allure des faunes et des flores, telles que les mammifères supérieurs ou placentaires qui apparaissent brusquement dans l'éocène inférieur d'Europe et d'Amérique sans qu'on y connaisse leurs ancêtres, ou les plantes dicotylédones qui se sont répandues de tous côtés à l'époque crétacée. En outre, l'étude encore si incomplète des îles pacifiques y montre, tantôt des sédiments tertiaires relevés horizontalement ou des avenues de temples s'enfonçant dans la mer, ailleurs du granite (à Tahiti) et met en évidence des déplacements récents, dont le nombre et l'importance s'accroîtront sans doute quand la connaissance du Pacifique sera plus complète. Enfin, la dispersion de ces îles volcaniques émergeant côte à côte avec des fosses marines à l'intérieur du Pacifique rappelle ce que nous venons de trouver dans l'axe de l'Atlantique; nous

avons ici également l'impression d'une zone instable, exposée à des déplacements verticaux.

Ce qui frappe le plus sur les dernières cartes des profondeurs marines dans le Pacifique et ce qui apparaîtra sans doute mieux encore quand les sondages seront moins localisés, c'est une allure plissée, ou tout au moins ridée, qui se traduisait déjà par les chaînes d'îles souvent si curieusement alignées, mais qui existe également dans toute la partie recouverte par les eaux. Examinons notre figure 12 en tenant compte de sa très faible échelle et des simplifications qu'il a fallu par suite y apporter. Nous voyons, à l'est, quelques fosses marines le long de la côte sud-américaine, puis un plateau relativement surélevé n'atteignant pas 4.000 mètres de profondeur, qui s'allonge parallèlement à tout le continent américain. Là, s'il y a plissement, c'est dans le sens méridien, conformément aux plis des Andes. Mais, vers le 120^e ou le 130^e degré, à peu près suivant la courbe de 4.000 mètres *abc*, tout change et l'on entre dans un vaste espace dont les profondeurs dépassent couramment 4.000 mètres, et où cependant se dessinent toute une série de rides NO-SE, presque parallèles aux Montagnes Rocheuses, dont j'ai esquissé les directions (Hawaï, Marquises, Paumotou). A leur extrémité nord-ouest, toutes ces rides s'incurvent, comme le fait au nord la grande fosse limite des Aléoutiennes et des Kouriles; ou comme, plus au sud, la zone de profondeurs qui part au sud d'Hawaï pour aboutir aux Philippines. Puis, vers le sud-ouest, l'inflexion se fait en sens inverse, parallèlement à la Nouvelle-Guinée et à la direction première, avec coupure aux îles Tonga. Et c'est ainsi que le cercle se

ferme, laissant en dehors de lui tout le haut plateau qui porte les îles de l'Insulinde. La région qui est à l'est du Japon et des Philippines présente des alignements de très profondes fosses marines, où se reproduit en creux la disposition affectée en relief par ces mêmes îles. Le caractère plissé est là on ne peut plus manifeste.

Enfin, à travers cet ensemble, la fosse des îles Tonga, dont j'ai déjà dit un mot précédemment, marque un décrochement gigantesque analogue à celui que nous observons, avec des dimensions très restreintes, suivant le grand sillon houiller du Plateau Central français. Rien n'empêche, d'ailleurs, de supposer que ce grand accident, avec une partie des plissements signalés plus haut, ait été préparé dès l'époque primaire pour prendre tout son développement pendant le tertiaire.

CHAPITRE IV

Les Relations de la Géologie avec les autres sciences.

I. LA MORT DE LA TERRE ET DU SOLEIL. — LES ÉVALUATIONS GÉOLOGIQUES EN ANNÉES. — II. COMPARAISON AVEC LA LUNE. — III. L'INTÉRIEUR DE LA TERRE.

Les géologues sont très généralement des naturalistes et, par leur tournure d'esprit comme par leur éducation, se trouvent attirés de préférence vers les problèmes qui se rattachent aux sciences naturelles, vers les problèmes de la vie. Pendant la longue période où la stratigraphie a constitué la presque totalité de l'enseignement géologique, il est même arrivé que la paléontologie fût considérée comme l'une des sciences géologiques les plus importantes, alors que son domaine propre appartient à la zoologie, dont elle est appelée à nous retracer l'évolution. Cependant la prépondérance aujourd'hui accordée à la tectonique conduit à examiner désormais, avec un soin particulier, le côté purement mécanique des phénomènes orogéniques et l'on commence à entrevoir le temps où, la connaissance de l'écorce superficielle étant mieux assise, le géologue éprouvera la curiosité de pénétrer plus avant dans les profondeurs de la Terre : soit, effectivement, par des trous de sonde;

soit théoriquement par des spéculations qu'il a jusqu'ici abandonnées aux géodésiens, aux géophysiciens ou aux astronomes (1).

A peine sommes-nous encore à l'aurore de ce temps nouveau. Néanmoins il n'est pas besoin d'être grand prophète pour annoncer que notre champ de recherches par sondages et mines, actuellement limité à un kilomètre de la superficie, descendra bientôt à deux, puis à trois. Ce sera d'abord le résultat d'une technique plus perfectionnée; mais ce progrès de la technique sera lui-même provoqué et accéléré par des besoins inconnus de nos pères, par des prix de vente largement supérieurs à ceux du passé. L'époque actuelle nous fait connaître (d'une manière, il est vrai, un peu factice et, jusqu'à un certain point, provisoire), ce qui se passera dans l'avenir prochain où nos mines de charbon s'épuiseront, où le pétrole, sur lequel on compte en ce moment pour remplacer la houille, fera lui aussi défaut. Alors on aura eu beau organiser l'utilisation de la houille blanche, il faudra bon gré mal gré s'enfoncer dans la Terre pour aller y chercher les ressources en calories qu'elle renferme : d'abord les combustibles enfouis à plus de mille mètres au-dessous de la surface, qui nous semblent aujourd'hui indignes d'être explorés; puis la chaleur interne ou la radioactivité.

Afin de satisfaire à ces besoins matériels, l'industriel implorera l'aide de la science et, ainsi qu'il arrive toujours, la science des causes, la vraie science profitera de l'appui qu'elle fournira pour s'instruire elle-même.

(1) On trouvera l'écho de ces préoccupations dans le dernier volume d'Édouard Suess, avec le mélange d'intuition géniale, d'érudition et d'obscurité qui caractérise ce savant.

Or, en pénétrant au-dessous des couches qui furent un jour superficielles et qui, un jour, s'incorporèrent des restes de vie, l'homme entendra bientôt s'éteindre la rumeur de cette vie éphémère; la Terre, autour de lui, se taira de ce grand silence qui convient à la matière. Comme s'il s'était égaré dans les espaces interstellaires, il ne rencontrera plus rien qui puisse rappeler l'apparence d'une volonté ou d'un instinct, mais seulement la course vertigineuse des atomes; la géologie d'alors ne sera plus qu'un cas particulier de l'astronomie, une application de la physico-chimie.

Sans vouloir s'égarer dans un avenir bien lointain, il est aisé de prévoir deux étapes de ce progrès futur : la première où l'on multipliera les sondages de 2 à 3.000 mètres, afin de découvrir, d'après quelques indices superficiels, la houille, le pétrole, les eaux bouillantes, les minerais cachés; la seconde, où des appareils de physique suffisamment perfectionnés décèleront les mêmes substances à partir de la surface et assureront ainsi à des forages de plus en plus coûteux de meilleures chances de succès. On est en droit d'imaginer, par exemple, que, tôt ou tard, on tentera quelques grands sondages au voisinage d'une immense agglomération comme Paris, pour aller à la fois chercher le charbon qui existe peut-être sous le bassin secondaire et tertiaire et, plus encore, pour se procurer des sources inépuisables d'eau à l'ébullition, d'énergie et de chaleur. L'étude du degré géothermique, autrement dit la loi de l'accroissement que subit la température en profondeur, offrira alors un intérêt de premier ordre pour déterminer les régions, telles que l'Auvergne, où 1.000 à 1.200 mètres peuvent suffire pour atteindre la température de vapo-

risation et celles telles que Paris où il faudrait dépasser 3.000 mètres. Cette recherche de la chaleur interne qui, avec celle de la chaleur solaire, prendra une importance croissante à mesure que l'humanité vieillira, pourra alors contribuer à la localisation des villes.

Je me borne, dans ce chapitre, à signaler cette question des explorations profondes, que je me propose de traiter ultérieurement dans le chapitre VI et je vais de préférence m'arrêter sur quelques autres problèmes d'ordre astronomique ou physico-chimique, dont l'application pratique ne se pose pas encore.

I. LA MORT DE LA TERRE ET DU SOLEIL. LA DURÉE DES PHÉNOMÈNES GÉOLOGIQUES.

Écartons-nous d'abord de la Terre pour lui restituer sa juste place au milieu des autres corps célestes, pour la comparer à ceux dont la constitution nous est quelque peu connue et pour en déduire un enseignement possible sur sa destinée future.

Je ne parlerai pas ici de Mars, dont la topographie et la météorologie restent, quoiqu'en disent certains observateurs enthousiastes, beaucoup trop problématiques et incertaines, et je ne discuterai pas, après tant d'autres, la pluralité des mondes habités. Habitée, il nous suffit que la Terre le soit et que cette présence des êtres vivants ou des hommes soit, d'ailleurs, incapable de changer quoi que ce soit à sa forme finale ou à sa course dans l'éther. Mais la terre a-t-elle eu un commencement et aura-t-elle une fin; quelles étapes de son évolution a-t-elle franchies; comment peut-on évaluer ces étapes

passées ou futures en années? Voilà des questions que nous ne pouvons nous empêcher de poser et auxquelles astronomes, physiciens et géologues s'efforcent, en se mettant d'accord, de balbutier des réponses.

L'homme a instinctivement horreur de la mort et, sachant qu'il ne l'évitera pas, il est obsédé par sa pensée. Dès qu'il commence à réfléchir, il perd la confiance qu'a pu d'abord lui inspirer l'apparente stabilité des choses; et, concevant dès lors l'univers à son image, il s'habitue à penser que tout, comme lui, doit périr. Cette idée, qui le navre, n'est pas sans lui inspirer en même temps quelque vanité. Sachant qu'il doit mourir, il se console un peu en pensant que les plus puissants empires ont disparu comme il mourra, que la Terre deviendra un jour un cadavre avant de se désagréger en poussière et que les soleils, les univers subiront tous à leur tour la même loi. A la première question que je viens de poser, la plupart des savants seront donc portés à répondre d'instinct par l'affirmative. La naissance et la mort de la Terre ne leur paraissent pas plus douteuses que la naissance et la mort du Soleil, et leur stupéfaction serait grande si on leur démontrait que quelque groupement de matière stellaire est susceptible d'échapper à l'universel « devenir », au flot mouvant de ces apparences vaines appelées par nous les réalités : qu'il existe un point fixe dans l'espace, une forme de matière éternelle.

Cette conviction a été particulièrement arrêtée chez les savants du XIX^e siècle, généralement imprégnés de positivisme, alors que l'on croyait possible de tout expliquer et que l'on admettait volontiers, comme des dogmes, les solutions provisoires de toutes nos questions trop impatientes. J'ajoute que ce positivisme se trou-

vait ici d'accord avec la métaphysique spiritualiste qui, réservant l'éternité comme un attribut divin, refuse de l'attribuer à des formes de la matière.

Mais dans quelle mesure cette affirmation offre-t-elle un caractère de rigueur scientifique? C'est ce qu'il nous importerait singulièrement de savoir, ne fût-ce précisément que pour en tirer des conclusions métaphysiques.

Ici nous abordons le terrain fascinant et troublant de la cosmogonie, dont les abîmes effraient déjà le génie de Pascal et nous entrons, il faut bien l'avouer, dans le tourbillon confus des hypothèses contradictoires. Tout paraît clair, tout s'ordonne, tout séduit l'esprit quand on envisage une seule des solutions proposées; mais on s'aperçoit bientôt qu'il existe deux ou trois autres hypothèses également spécieuses et contradictoires. La physique et l'astronomie ont beau s'évertuer, plonger des regards avides à des distances de plus en plus hors de proportions avec les dimensions terrestres, remettre notre univers solaire en marche parmi les autres univers, étudier, analyser, disséquer des amas d'étoiles extraordinairement lointains, comme cette nuée de Magellan dont les soleils sont cent ou mille fois plus grands que le nôtre et dont la lumière met 30.000 ans à nous parvenir : nous reculons ainsi les bornes du fini sans acquérir davantage la compréhension de l'infini; nous plongeons dans le passé en assistant par notre vision directe à des événements qui se sont produits il y a trente siècles; en définitive, nous n'en savons pas plus sur le commencement ni sur la fin de tout; notre effort n'a fait que reculer un peu, dans l'espace et dans le temps, le champ du mystère.

Il est deux manières d'aborder par la science de tels

problèmes : d'un côté, les mathématiques; de l'autre, la physique (à laquelle je rattache ici l'astronomie) et la géologie. La méthode mathématique part nécessairement de quelques données expérimentales; mais elle abandonne aussitôt ce champ solide pour adopter des hypothèses qui lui paraissent grouper les faits acquis et elle en déduit les conclusions analytiques. Celles-ci se présentent alors avec les apparences d'un bel édifice assis sur la logique; mais il ne faut pas en scruter la base fragile. La méthode physique est moins aventureuse et, sauf à paraître ignorants ou sceptiques, ceux qui la pratiquent se risquent moins volontiers au delà des observations acquises qu'ils se bornent à suivre pas à pas. Voyons rapidement à quoi nous conduisent ces deux systèmes.

Les hypothèses mathématiques de la cosmogonie ont été, il y a peu d'années, étudiées par Poincaré qui les a passées toutes en revue, depuis la vieille théorie de Laplace, restée toujours la plus plausible quand on se borne à notre système solaire, jusqu'aux curieuses et attrayantes spéculations de Svante Arrhenius. L'impression que l'on retire de son livre est que ce domaine ressemble singulièrement à celui de la métaphysique, où, depuis des milliers d'années, on raisonne et discute sans jamais conclure. Pour les uns, tels que Lord Kelvin, il y a nécessairement un commencement et une fin en vertu du principe de Carnot, puisque l'énergie se dégrade sans cesse en chaleur et ne peut revenir en arrière. Mais d'autres font la très simple supposition que le principe expérimental de Carnot peut cesser un jour d'être vrai, ou qu'il est déjà en défaut dans les espaces interplanétaires, les astres étant alors assimilables à des projec-

tiles et leur énergie redevenant du travail. Ou bien encore, ils supposent avec Arrhenius que l'univers est une vaste machine thermique dont la source chaude est formée par les étoiles et la source froide par les nébuleuses. Les nébuleuses étant très peu denses, les molécules chaudes à grande vitesse s'en échappent constamment, de sorte que la nébuleuse reste froide tout en recevant de la chaleur et qu'elle réalise ainsi une sorte de mouvement perpétuel.

De même, lord Kelvin, qui, avec son tempérament anglais et son amour des représentations réelles, se résignait difficilement à concevoir l'infini, supposait volontiers des bornes à notre univers, donc une déperdition d'énergie au dehors; il ne pensait pas, dès lors, que le nombre des étoiles éteintes fût considérable, tandis qu'Arrhénius le croit infini. Pour l'un, les astres se sont allumés à la fois comme l'éclairage d'une place publique un jour de fête et peu d'entre eux sont éteints. Pour l'autre, l'espace est comparable à une de ces villes turques où les cimetières tiennent plus de place que les demeures des vivants. Dans un cas, les trous noirs du ciel constellé sont réellement vides; dans l'autre, ils fourmillent d'astres morts, ou d'astres si lointains que leur lumière est absorbée par l'éther avant de nous parvenir.

Mathématiquement, on peut démontrer tout ce qu'on veut, puisque les conclusions sont toujours renfermées implicitement dans un postulatum préliminaire. L'éther interposé entre les molécules de matière éteint-il, si peu que ce soit, la lumière et la force attractive (comme on est tenté de le croire), ou les laisse-t-il filtrer sans en retenir la moindre trace suivant la théorie

classique? Tel est, au fond, le point essentiel sur lequel on ne s'entend pas. De même, peut-on, ou non, appliquer à l'univers la théorie cinétique des gaz, où les molécules gazeuses sont supposées douées d'une parfaite élasticité (bien théorique), ou leur force vive peut-elle être détruite par le choc, ce qui semble plus probable? L'éther est-il un grand espace libre et entièrement vide, où tous les mouvements s'effectuent sans accident, dépense de force ni rencontre, suivant les commodités des mathématiciens; ou ce qui s'y passe est-il plus comparable, au degré près, avec ce que nous observons dans le rayon de notre terre? De même, la nébuleuse a-t-elle commencé par être chaude, comme le croyait fermement Laplace, ou, suivant la thèse actuelle, était-elle d'abord à 200° au-dessous de zéro? Enfin les planètes ont-elles été captées par le soleil, ou en sont-elles émanées? Comment, devant de telles incertitudes, oser émettre une affirmation quelconque et comment croire à de beaux calculs qui prétendent déterminer la durée du refroidissement solaire ou terrestre, alors qu'on ignore l'existence, ou tout au moins la marche du phénomène?

Les physiciens, les astronomes observateurs (et non calculateurs) et les géologues se mettent plus aisément d'accord sur quelques points parce que leur ambition est moins haute : parce qu'ils restreignent la hardiesse de leurs extrapolations à la phase actuelle de notre univers solaire, ou de quelques univers constellés voisins du nôtre, parce qu'ils refusent de remonter au chaos originel ou d'entrevoir la dissolution finale, de même qu'ils laissent aux métaphysiciens le souci de comprendre l'infini. Or, pour les géologues, il ne semble guère douteux que la Terre traverse une phase de refroidissement,

à laquelle se rattachent et par laquelle semblent s'expliquer tous les faits de l'histoire géologique. Ils laissent dire ceux pour lesquels la teneur en radium des roches devrait, au contraire, amener un réchauffement. Et ils tirent volontiers aussi, de leurs observations, la conclusion que le Soleil, pendant cette même phase, a dû se contracter, en récupérant par cette contraction la chaleur dépensée au dehors. Mais il leur est impossible d'aller au delà ni avant ni après et, s'ils s'y hasardent, c'est par cette sorte d'instinct auquel je faisais allusion dans le début de ce chapitre, en utilisant les calculs des mathématiciens, soit pour assimiler la mort de la terre à la destinée humaine, soit pour chercher dans un renouvellement indéfini des cycles solaire et terrestre le mirage d'une éternité.

Reprenons cependant, comme un beau roman dont on ne saura jamais le dénouement réel, ces imaginations astronomiques. Cherchons quels sont, suivant elles, pour la Terre, les points de départ et d'arrivée possibles. Au départ, si la théorie de Laplace est vraie pour notre système solaire (et nous en sommes tous plus ou moins imprégnés), le chaos a commencé par se grouper en nébuleuses animées d'une rotation uniforme; puis notre nébuleuse, qui avait un centre dense entouré d'une atmosphère ténue, s'est contractée en se refroidissant et a abandonné à l'équateur des anneaux nébuleux, peu à peu rassemblés en masses sphéroïdales. S'il faut préférer la théorie de M. de Ligondès, le chaos primitif était assimilable à un gaz, dans lequel les molécules, distantes les unes des autres, se comportaient comme des projectiles. Le choc de ces projectiles a amené des concentrations progressives de matière en

des corps stellaires, échauffés au début par l'annulation de leur force vive. Pour G. H. Darwin, qui remonte moins loin dans le passé, la rotation des planètes a été peu à peu ralentie par la dépense de force vive que comportent les marées dont elles sont la cause sur d'autres astres, ou qui exercent leur frottement sur elles-mêmes. Ainsi la Lune s'est séparée de la Terre et s'en est éloignée peu à peu, tandis que la Terre ralentissait son propre mouvement. Pour Lord Kelvin, un nombre limité de soleils, allumés à la fois dans un espace fini, dégrade peu à peu son énergie en chaleur jusqu'à la mort finale. Pour Sir N. Lockyer, les nébuleuses sont d'abord très froides et seulement éclairées par incandescence; puis elles s'échauffent peu à peu par le choc de leurs météorites; en raison de cet échauffement où elles se vaporisent, il finit par se constituer des étoiles gazeuses, qui alors se refroidissent, se condensent et se solidifient progressivement. Une phase de refroidissement succède à une phase d'échauffement. La couleur de l'étoile passe ainsi par une succession de deux séries inverses. Enfin Svante Arrhénius, faisant intervenir la pression de radiation (1), suppose que de petites particules échappées du Soleil vont s'agglutiner pour former des météorites, puis des astres, d'abord progressivement échauffés, ensuite peu à peu refroidis et encroûtés de scories. Mais il rend le cycle indéfini en admettant que l'étoile morte ou plutôt léthargique

(1) Suivant Arrhénius, dès que le diamètre de la molécule passe au dessous d'un millième de millimètre, la force répulsive du soleil l'emporte sur l'attraction. Cinq fois plus petite, cette molécule atteint son maximum de vitesse et peut arriver sur la terre en une cinquantaine d'heures.

peut un jour, après une longue période obscure, éclater sous un choc libérant brusquement toute l'énergie endormie à l'intérieur (1). L'explosion reformerait alors une nébuleuse, elle rallumerait le flambeau d'une « Nova ».

Cette dernière hypothèse rend toute prédiction impossible sur l'avenir de la Terre. Nous sommes à la merci d'un choc étranger, qui viendrait remettre la Terre à l'état de fusion en recommençant toute l'histoire géologique, et on ne peut pas, comme l'imaginait jadis un inventeur trop ingénieux, songer à s'en préserver par un puits creusé en plein Sahara jusqu'à la matière ignée de manière à faciliter l'échappement de cette ignition interne à la suite du choc. L'humanité a donc le choix de finir ainsi par un incendie, ou, comme on l'imagine plus habituellement, par la glaciation, à moins qu'un autre mécanisme inconnu et moins violent ne renouvelle la chaleur terrestre...

Nous ne sommes pas mieux renseignés sur le passé et l'avenir du Soleil, auquel nous relie une solidarité si étroite. Le Soleil brille et c'est lui qui nous fournit notre chaleur et notre énergie, puisque la chaleur interne intervient à peine dans la température superficielle. Nous ne remarquons pas que ce grand foyer se refroidisse ou diminue d'éclat. Mais, lorsque notre petite physico-chimie essaye de comprendre la permanence de l'activité solaire, elle doit avouer ici encore son impuissance. Si l'activité solaire s'était bornée à un rayonnement, elle

(1) Les probabilités de choc avec un autre astre lumineux ne sont pas bien prochaines, puisque notre groupe solaire n'atteindra pas la zone étoilée la plus proche dans la constellation d'Hercule avant cent mille milliards d'années. Mais la terre pourrait auparavant rencontrer un astre éteint invisible.

aurait amené la congélation en 6.000 ans. Si le Soleil était un bloc en combustion, de quelque matière combustible qu'on le suppose formé, il n'aurait pu rayonner plus de quelques milliers d'années. Une pluie de météorites, à laquelle on a songé, aurait dû se déceler par une foule d'indices inexistants. Cependant l'incandescence solaire dure toujours sans se soucier d'être incompréhensible aux hommes, et nous sommes réduits à quelques-unes de ces prétendues explications, variables avec la mode scientifique du jour, qui, sous des noms pompeux, dissimulent mal notre ignorance. Y a-t-il renouvellement constant de l'énergie solaire par la compression progressive d'une masse fluide? Se produit-il, à travers une photosphère et une chromosphère de température relativement faible, un rayonnement continu d'énergie interne, emmagasinée au début de la condensation solaire? La désintégration moléculaire intervient-elle comme dans les phénomènes de radioactivité? On peut s'amuser à traduire l'une ou l'autre de ces hypothèses en algèbre; mais combien Hamlet avait raison de dire que beaucoup de choses nous sont inconnues sous le ciel!

Et, maintenant, essayerons-nous d'appliquer des calculs en années à cette histoire de la Terre, dont le véritable commencement et la fin réelle nous échappent? On sera peut-être un jour en droit de le tenter, à la condition de se restreindre à cette phase relativement courte qui paraît avoir commencé avec la scorification de la croûte terrestre et qui finira, sauf rencontre d'un autre astre, par la congélation (1). Mais, là même, si nous pou-

(1) Voir la *Science Géologique*, p. 720 à 722.

vons, jusqu'à un certain point, compter sur l'avenir de la science, ses connaissances actuelles nous renseignent bien peu, et ceux qui affirment précisément un chiffre de 50, ou de 100, ou de 200 millions d'années pour l'âge de la Terre, entendu comme nous venons de le dire depuis sa solidification, ou pour celui du Soleil, nous semblent doués d'une foi bien imaginative, comme ceux qui prévoient sa mort exactement dans mille millions d'années. Un chiffre de 50 millions d'années pour la durée du soleil est dû à Lord Kelvin et à Hemholtz, qui y sont parvenus en supposant une nébuleuse froide et formée d'un gaz parfait, échauffée par sa contraction. Après quoi, en supposant que la Terre aurait autrefois parcouru des espaces chauds où elle aurait pris dans toute sa masse une certaine température uniforme, dissipée ensuite dans un espace plus froid, le même Kelvin a calculé le refroidissement de la terre, conformément au « mur indéfini » de Fourier. En admettant une température initiale de 3.000 degrés, on est arrivé à compter 100 millions d'années pour son refroidissement. Cela suppose, entre autres hypothèses, que le refroidissement, commencé brusquement à la superficie, n'ait pas encore gagné la partie centrale, restée à sa température première, tandis qu'en réalité le refroidissement s'est fait par rayonnement sur une boule probablement hétérogène dès le début. Une conséquence naturelle semblerait également devoir être que l'écorce contractée sur un noyau ayant conservé sa chaleur aurait dû devenir trop étroite, alors que, géologiquement, tout nous porte à considérer le noyau, ou tout au moins la base de l'écorce, comme plus contracté que la superficie. On ne peut donc s'étonner si M. Ruszki, reprenant le calcul, a

trouvé, en évaluant au contraire géologiquement la réduction du rayon par les plis observés à la surface, 3 milliards d'années.

Après quoi, quand on a découvert le radium, on a vu, dans son émission calorifique, l'origine du flux de chaleur interne révélé par le degré géothermique (indépendamment même de toute chaleur dépensée dans son refroidissement). Mais alors il est arrivé une singulière aventure. En prenant pour base des calculs la teneur moyenne des roches en matières radioactives, on en a trouvé, dans l'écorce terrestre, vingt fois plus qu'il n'était nécessaire. La Terre devrait se réchauffer au lieu de se refroidir. Ce qui a conduit des physiciens anglais à supprimer d'autorité ce radium gênant dans la profondeur de la Terre, où, d'autre part, son poids atomique si élevé devrait, au contraire, lui assigner sa place naturelle. Enfin, quand on tente de tels calculs, il ne faut pas oublier que le radium doit perdre la moitié de son activité en 2.000 ans, que l'uranium lui aussi disparaît avec le temps. Puisqu'il existe aujourd'hui des matières radioactives, il faut donc qu'il s'en forme dans l'intérieur de la terre, ou tout au moins qu'il en subsiste et qu'il en monte des émanations, peut-être sous l'influence des pressions exceptionnelles que nous pouvons y supposer.

Tout cela est encore bien obscur. Mais réduisons une fois de plus nos ambitions et ne remontons pas si haut. Les géologues seraient déjà fort satisfaits s'ils pouvaient évaluer en années quelque'une des périodes envisagées par eux, fussent les plus récentes. A cet égard, un de leurs espoirs est fondé sur l'observation des périodes astronomiques et leur corrélation possible avec certaines lois de la sédimentation.

L'histoire de la terre doit, en effet, dans l'hypothèse où l'on se place le plus habituellement, résulter de deux phénomènes bien distincts : d'une part, le refroidissement et la contraction propres à la Terre elle-même, considérée comme un globule quelconque de matière en fusion tournant autour d'un axe (le boulet rouge de Lord Kelvin, le mur indéfini de Fourier); d'autre part, l'intervention continuée des autres corps célestes, le Soleil et la Lune en premier lieu, dont l'influence est manifeste sur les marées de sa superficie (non seulement les marées aqueuses, mais même les mouvements rythmés de l'écorce élastique), possible aussi sur les marées de sa profondeur, tandis que l'attraction inverse de la Terre sur la Lune ou le Soleil doit diminuer sa propre vitesse de rotation. Or, si l'évolution indépendante de la Terre a pu se poursuivre suivant une loi quelconque, tantôt avec continuité, tantôt par brusques ressauts, dont la cause est trop complexe pour ne pas équivaloir à ce que nous appelons le hasard, les influences astronomiques ont dû, elles, affecter parfois des récurrences présentant un caractère cyclique et offrant par suite quelque prise aux calculs. Il s'agirait donc de découvrir en géologie des phénomènes régulièrement périodiques, auxquels on pourrait attribuer une origine astrale et dont la durée serait alors mesurable.

On s'est demandé un moment si les grandes transgressions marines ne se seraient pas produites ainsi, comme des marées démesurées, indépendamment de toute déformation attribuable à la croûte terrestre. Cette dernière hypothèse semble aujourd'hui tranchée par la négative. Mais il n'est pas démontré qu'une telle influence périodique ne soit pas intervenue dans certaines alternances

des séries sédimentaires, maintes fois répétées à intervalles presque égaux et dont quelques-unes ont déjà reçu le nom caractéristique d' « anneaux annuels », le mot années étant pris ici dans le sens de période comme pour les jours de la Genèse. Actuellement, bien des géologues sont séduits aussi, peut-être à l'excès, par le caractère de généralité qu'ils croient pouvoir attribuer à certains phénomènes glaciaires, à certains niveaux de terrasses fluviatiles, et ils établissent, dans cet ordre d'idées, des rapprochements à grande distance qui seraient du plus haut intérêt s'ils étaient réels, mais dont l'affirmation me paraît, elle aussi, encore bien hardie (1).

Parmi les phénomènes propres à la Terre, sur lesquels on a pu fonder des calculs également prématurés, les deux principaux sont le refroidissement hypothétique, mais probable, qui forme aujourd'hui la base de toutes nos hypothèses géologiques, puis la vitesse de sédimentation ou d'érosion et la formation de la salure marine.

En ce qui concerne le refroidissement dont j'ai déjà parlé, un fait paraît certain, c'est que la Terre constitue une source de chaleur dans une enceinte froide et que, par conséquent, elle rayonne constamment de la chaleur dans l'espace, en se refroidissant (sauf intervention radioactive) suivant une loi mathématique que vient troubler sa contraction résultant de ce refroidissement même. Nous connaissons la loi d'accroissement calori-

(1) Les géologues suédois ont compté les alternances de lits clairs et foncés qui caractérisent certaine formation quaternaire marine postérieure à la grande glaciation scandinave, en attribuant, les uns à l'été, les autres à l'hiver. Ils ont ainsi trouvé 2000 ans pour les deux dernières divisions du paléolithique : le Solutréen et le Magdalénien.

fique interne (degré géothermique) dans les très faibles limites de 2 kilomètres que peuvent aborder nos explorations souterraines. Nous savons également que la densité moyenne de la Terre (5,50) est très supérieure à sa densité superficielle de 2 à 3, ce qui conduit à supposer une densité de 10 dans la masse profonde ou barysphère. Mais tout le reste nous est à peu près inconnu : constitution interne de la matière, composition chimique, température, pression, élasticité, etc. Nous ne sommes même pas fixés sur les points importants de savoir si l'accroissement de chaleur se poursuit jusqu'à la zone centrale; s'il existe un noyau en ignition; ou si les matières en ignition forment de vastes laccolithes interposés entre l'écorce scoriacée et un noyau soumis à une pression formidable : un noyau de gaz métalliques extraordinairement condensés, comme l'a fait supposer l'élasticité du globe prouvée par les phénomènes sismiques.

Quant à la sédimentation, à l'érosion ou à la salure des mers, rien ne saurait être plus dangereux que d'opérer à cet égard par actualisme, en assimilant le passé de la Terre à son présent. Quel rapport peut-il y avoir entre les érosions de notre période tranquille et celles des phases tourmentées qui ont suivi le surgissement des grandes chaînes alpestres, alors que les largeurs de nos cours d'eau français se comptaient par 10 ou 20 kilomètres, quand des accumulations de galets donnaient l'épaisseur d'un Righi? On part nécessairement de ce fait qu'il y a, en ce moment, chaque année, tant de sédiments déposés, tant de terrains érodés, tant de sel entraîné à la mer. N'en est-il pas de tels calculs comme des prévisions que l'on faisait en 1913 sur l'état de

guerre futur et sur la consommation de munitions? Je ne crois pas que l'on puisse, de cette manière, fixer seulement l'ordre des grandeurs, même pour cette extrêmement petite période où l'homme a habité la Terre. Tout au plus peut-on, dans une certaine mesure, supposer que les chiffres calculés correspondent à des maxima, puis comparer entre elles les grandes périodes géologiques, au cours desquelles paraissent s'être produits des phénomènes comparables et reconnaître ainsi que notre division en périodes géologiques est très inégale : les plus anciennes, que nous avons réunies en bloc parce que nous les connaissons mal, ayant dû être beaucoup plus longues que les récentes, où nous avons pu établir des subdivisions à l'infini.

Je n'estime pas non plus que l'on puisse se fonder sur la vitesse d'évolution organique, alors que l'évolution même demeure une simple hypothèse très plausible, dont nous ignorons le mécanisme et, par conséquent, la loi, surtout dans une époque où les paléontologues découragés semblent renoncer, pour la plupart, à l'établissement de ces arbres généalogiques qui les avaient tous passionnés il y a quelque temps.

Restent les phénomènes de radioactivité, auxquels j'ai déjà fait allusion et qui ont récemment motivé tant de travaux. L'hypothèse (demeurée aussi tout hypothétique) est celle d'une désintégration spontanée de certains éléments chimiques, amenant, en un temps que l'on pourrait peut-être apprécier, le développement d'éléments nouveaux aux dépens d'éléments antérieurs. De même que l'on mesure aujourd'hui la vitesse des réactions chimiques, on peut arriver à mesurer la vitesse de ces réactions pour ainsi dire extra-chi-

miques, dont la plupart, ne l'oublions pas (en particulier celles de Sir William Ramsay), demeurent encore très contestées. Si, par exemple, l'hélium des roches ou des eaux thermales provient de telle ou telle substance radioactive, la proportion de cet hélium peut indiquer depuis combien de temps la substance en question s'est constituée. Si les halos développés autour des zircons englobés dans le mica des granites ou des diorites ont pour origine l'hélium dégagé par ces zircons, leur intensité donne également une appréciation de leur durée. Dans cet ordre d'idées, j'ai pu moi-même être tenté d'étudier certaines relations numériques entre les métaux associés dans un même gisement. Si un métal provient d'un autre par une transmutation spontanée, il sera d'autant plus abondant qu'il aura eu plus de temps pour se produire (1). De toutes ces idées qui ont besoin de mûrir, il ne se dégage encore rien de définitif. Je me borne à remarquer que l'on a trouvé : pour certaines roches à urane du carbonifère, 400 millions d'années : pour des roches archéennes de Suède, 1.300 et 1.400 millions.

II. COMPARAISON DE LA TERRE AVEC LA LUNE

J'ai déjà fait allusion à une théorie de G. H. Darwin, qui assimile la Lune à un fragment détaché de la Terre (2), et j'ai dit aussi qu'il existait des théories toutes contraires, également plausibles, d'après lesquelles la Lune aurait été captée par l'attraction terrestre et serait

(1) *C. R. Ac. des Sc.* 4 juillet 1910 et *Bul. Soc. Géol.* 5 décembre 1910.

(2) Page 53.

même destinée un jour à grossir notre globe. Cependant, on peut, comme l'a fait Suess qui se range sans hésitation à la conception de G. H. Darwin, chercher à cette hypothèse une confirmation et des précisions géologiques.

D'après G. H. Darwin, un ellipsoïde à trois axes inégaux, animé d'un mouvement de rotation très rapide et devenu instable, aurait subi un étranglement équatorial (disposition en forme de poire) et un fragment, représentant environ $1/80$ du total, se serait écarté progressivement. L'attraction réciproque, très puissante au début quand les deux astres étaient rapprochés, aurait alors déterminé en eux, par le jeu des marées externes et internes, une dépense d'énergie amenant une diminution progressive de la vitesse de rotation. Sur la Terre, la résultante des attractions lunaires, ne passant pas par le centre de gravité, devait exercer un freinage. Sur la Lune, l'attraction inverse devait diminuer la vitesse angulaire de révolution et accroître l'orbite. La révolution lunaire aurait été ainsi annulée, en même temps que la rotation de la Lune autour de la Terre se serait réduite. De même, la durée de la rotation terrestre aurait grandi jusqu'à 24 heures et serait destinée à atteindre 55 heures, le mois prenant alors la même valeur que le jour et la Terre devant tourner alors toujours la même face vers la Lune, comme celle-ci le fait vers la Terre. A l'appui de cette idée, on peut remarquer que la Lune a seulement une densité de 3,4 contre 5,5 pour la Terre, comme si elle était un fragment de notre écorce superficielle (mais cela pourrait également tenir à ce qu'elle se serait arrêtée à un degré moindre de condensation). Certaines météorites reproduisent aussi l'étranglement présumé.

Il est intéressant de chercher si la géologie apporte un appui quelconque aux déductions que l'on peut tirer de cette idée première (1).

On a pu d'abord remarquer que, lorsque la Lune était encore voisine de la Terre, il a dû se produire, sur celle-ci, des marées formidables. Mais toutes les chances sont pour que les traces de ces marées, antérieures aux sédimentations datées par des fossiles, aient disparu à nos yeux. Des savants anglo-saxons se sont également attachés à retrouver sur la Terre le point d'attache primitif de la Lune. Pour juger leur conclusions, il nous suffira de redire que, suivant Sollas, notre hémisphère continental représenterait le gros bout de la poire, qui, suivant Lapworth, serait constitué par la masse des terres arctiques et, suivant Love, par le Pacifique, tandis que, suivant Pickering, la Lune se serait détachée de la Terre exactement à 1.600 kilomètres N.E. de la Nouvelle-Zélande, par 25° de latitude Sud. Cela rappelle un peu l'époque où le système tétraédrique était adopté avec une égale ferveur par plusieurs de nos principaux savants français qui le plaçaient chacun différemment.

Attachons-nous plutôt à étudier la structure de notre satellite, telle qu'elle nous est aujourd'hui bien connue par l'atlas photographique de la Lune, exécuté, dans ces dernières années, à l'Observatoire de Paris. Quand on examine cette structure avec l'idée de la comparer à la Terre, ce sont les différences qui frappent d'abord. Toute la superficie terrestre porte la trace évidente de deux

(1) Voir *Science Géologique*, p. 124 bis, et *La géologie comparée des corps célestes* (*La Nature*, 11 novembre 1916), ou SUESS, III, 1547-1591).

phénomènes : précipitations aqueuses et plissements. Sur la Lune, on n'aperçoit que des phénomènes volcaniques, des dénivellations verticales, aucune trace de sédiments, ni de mers, ni de végétation, ni de vie. Pour comparer la Terre avec la Lune, il faut donc commencer par dépouiller notre globe en pensée de ces océans et de ces sédiments plissés qui occupent à peu près toute sa superficie. Il faut se reporter vers certains grands champs volcaniques exceptionnellement restés à nu parce qu'ils sont très jeunes, tels que la Campagne Romaine, l'Islande, le Kilauea des îles Hawaï, penser à l'aspect qu'offrirait le Pacifique si les eaux y disparaissaient, etc. Mais, plus généralement, on doit se dire que la Lune représente une coupe profonde de notre globe et nous offre l'apparence possible de ce globe au-dessous des mers et des sédiments, qui absorbent à tort notre attention par leur rôle superficiel. C'est le grand intérêt que pourrait présenter cette comparaison si nous avions le moyen de la pousser assez loin et si la Terre offrait encore cette unité de structure qu'elle semble en réalité avoir, depuis longtemps, perdue.

La Lune n'a pas dû toujours être privée d'atmosphère et d'eau comme elle l'est aujourd'hui. Soit qu'elle ait été séparée de la Terre, soit que, constituée indépendamment dans des conditions analogues, elle ait été captée par notre globe, elle a dû, comme la Terre, présenter à l'état fluide la même répartition des atomes chimiques dans l'ordre croissant de leurs poids atomiques, que j'ai montrée ailleurs avoir été au début une loi fondamentale de la matière (1). Elle a peut-être ignoré

(1) Voir *Science Géologique*, p. 630.

le noyau particulièrement lourd qui donne à la Terre sa densité supérieure; mais elle aura connu aussi une enveloppe d'oxygène et d'hydrogène, qui, peut-être parce qu'elle était plus mince, s'est plus rapidement fixée sur les métaux ignés en les scorifiant, ou, pour l'hydrogène, en fuit vers l'éther. Les caractères de son volcanisme et la composition chimique que l'analyse spectrale fait présumer pour ses laves permettent de supposer que ces roches se sont formées par oxydation en dégageant des gaz et de la vapeur d'eau comme les nôtres. Il n'est pas invraisemblable que quelques sédiments se soient au début produits sur la Lune; mais ils auront été refondus ou recouverts de laves et nous ne les distinguons plus. L'absence de sédiments a donc supprimé toute possibilité de plissements. La solidification, plus profonde par rapport à un rayon beaucoup plus réduit (avec mêmes températures initiales pour la source chaude et la source froide) devait, de son côté, diminuer les occasions de mouvements tangentiels.

Ainsi la Lune ne nous représente pas seulement une coupe profonde, mais aussi, sans doute, un aspect ancien de la Terre, au moment où sa croûte oxydée se solidifiant n'avait pas encore subi les précipitations aqueuses et les ruissellements qui ont formé les océans. Les traits lunaires que nous pourrions retrouver sur la Terre nous apparaîtront donc comme des caractères primitifs et les indices d'un ancien plan, masqué ensuite pour nous par des constructions et reconstructions nouvelles, par la superposition confuse de plusieurs plans successifs. L'histoire de la Lune s'arrête au moment où toute la réserve de matières gazeuses y a été épuisée, et la seconde phase de l'histoire terrestre, celle qui

occupe à proprement parler notre géologie, y fait défaut.

J'insiste sur cette idée que, le refroidissement d'un astre ayant lieu par rayonnement de sa superficie vers le froid absolu de l'éther, si un semblable globe était homogène, il devrait se contracter d'une façon continue comme un globule de scorie ou comme un boulet rouge. Les accidents mécaniques, sous la forme de dislocations verticales ou de plissements tangentiels, sont la conséquence nécessaire d'un défaut d'homogénéité, d'un contact précaire et mal équilibré entre des masses en ignition et des croûtes solides flottant à la surface.

Supposons les noyaux liquides localisés dans l'épaisseur d'une masse rocheuse, tout se réduit à des fissures qui s'ouvrent, des abcès qui crèvent, des effondrements circulaires : c'est le type lunaire. Admettons que les masses liquides occupent une plus grande extension avec plus de continuité dans une sphère plus volumineuse, en allant ou non jusqu'au centre, les mouvements se généralisent et provoquent des déplacements tangentiels : c'est le type terrestre. L'accumulation des sédiments fait ici que des refusions se produisent en profondeur, et ces roches de profondeur peuvent être ramenées au jour; donc le type granitique apparaît sur la Terre, juxtaposé avec le type lavique. Enfin, le rayon devenant encore plus grand sur un autre astre, la consolidation générale de la croûte doit être retardée et devenir très difficile, de même que toute la superficie d'un océan se congèle avec peine; au lieu d'un globe solide, il peut rester une condensation à l'état gazeux ou visqueux : ce serait le type solaire.

Dans l'examen plus détaillé de notre satellite, ce qui

frappe avant tout, c'est la grande quantité de cirques à arêtes plus ou moins vives et déchiquetées et, d'une façon plus générale, c'est la forme circulaire de la plupart des contours, où cependant des accidents rectilignes sont à noter, comme le « mur droit » (Straight wall), qui constitue une dénivellation brusque, une sorte de faille de 100 kilomètres de long, ou encore cette fosse d'effondrement qu'on appelle la Grande Vallée dans le massif dit des Alpes (vallée de 70 kilomètres de long sur 10 de large et 3 de profondeur), comme enfin le remarquable réseau d'accidents orthogonaux autour de Herschel et Arzachel. Il est impossible, en voyant cette surface criblée de pustules, de ne pas songer à la solidification d'une croûte de scories traversée par des sortes d'immenses bulles gazeuses qui viennent éclater au dehors, ou tout au moins fendue et transpercée par des cheminées volcaniques; et, si cette idée n'a pas été plus généralement adoptée du premier coup, si l'on a préféré parfois invoquer un bombardement par des chutes d'astéroïdes (un système d'entonnoirs analogues à ceux du front franco-allemand dans la Grande Guerre), c'est qu'on a commencé par admettre jadis de parti pris l'absence totale, à aucune époque, d'air, de gaz et d'eau sur la Lune. On arrive, au contraire, très bien à s'imaginer une croûte mince se solidifiant par la juxtaposition de compartiments polygonaux, puis subissant des refusions inégales à la base, des affaissements circulaires bordés d'intumescences, des projections de cendres et des épanchements; l'augmentation progressive de la croûte amenant, comme sur la Terre, la localisation de plus en plus grande et l'atténuation des dislocations; enfin l'attraction plus faible et la pesanteur moindre per-

mettant la disparition complète vers l'espace des principes légers non fixés par la scorie.

Envisageons les divers aspects des caractères lunaires. Nous y voyons surtout, je viens de le rappeler, de grandes régions circulaires, dont les parois abruptes sont découpées par des failles en échelons : les prétendues « mers », au centre desquelles se dressent des cratères adventifs correspondant à une phase ultérieure de la solidification. Les bords en sont très irréguliers et hérissés de pointes. Le fond, qu'on s'imagine souvent horizontal, est lui-même très inégal, comme on le voit par la disposition des ombres sous un éclairage oblique. Plusieurs de ces pustules peuvent chevaucher l'une sur l'autre; un petit cratère peut se placer en travers sur le bord d'un cratère plus grand. La solidification des laves a visiblement passé par plusieurs stades successifs, au cours desquels l'intensité du phénomène a diminué progressivement, en même temps que le lac de lave, formant le fond du dernier cratère, s'enfonçait peu à peu. Dans quelques cas assez rares, on croit apercevoir des projections de cendres. Enfin, on a pu se demander si certaines ouvertures circulaires sur la Lune ne seraient pas comparables aux cheminées d'explosion, dans lesquelles ont cristallisé les roches à diamants du Cap : ce qui accentuerait encore le rôle des dégagements gazeux.

La seconde particularité intéressante que nous avons signalée pour la Lune, ce sont les dénivellations verticales, les failles, les fosses d'effondrement, dont nous venons de citer des exemples et que l'on peut comparer à nos vallées du Rhin et de la Limagne. Elles recourent souvent une série de protubérances cratériformes, aux-

quelles elles seraient donc postérieures. La Limagne, située en pleine région volcanique, ressemblerait singulièrement à un aspect lunaire si on pouvait la voir, à la distance de la Lune, débarrassée des 2.000 mètres de sédiments qui s'y sont accumulés en la nivelant.

Mais bien plus que par ces analogies locales, la comparaison avec la Lune serait intéressante si elle nous montrait réellement l'aspect primitif et profond de la Terre, tel qu'il subsisterait en partie au-dessous des sédiments. On peut faire cette remarque que certains grands bassins d'affaissement terrestres, appartenant, les uns à des aires continentales, les autres à des aires d'ennoyage marines, gardent, dans l'ensemble, une disposition grossièrement circulaire. Suess a signalé, à ce propos, le Bassin Parisien. On pourrait penser de même à la plaine Hongroise ou, sur une échelle immense, au Pacifique avec sa ligne de dépression marginale jalonnée de volcans et son plateau circulaire (aujourd'hui vers la profondeur de 4000 mètres), sur lequel se dressent, de tous côtés, des cratères volcaniques (1). Ce dernier, — si l'on néglige pour un moment ses plissements postérieurs, — pourrait figurer un compartiment primitif de la Terre, tel qu'il s'est constitué après la période ignée. Le Kilauea, par exemple, représenterait, dans cette immense zone d'effondrement, un champ de laves circulaire au second degré, sur lequel se greffent, à leur tour, une série de petits cratères adventifs. La fosse des îles Tonga, traversant cette mer de laves, serait comparable à une des fosses rectilignes lunaires.

(1) Voir, plus haut, pages 94 à 99.

Il est, d'ailleurs, curieux que, sur presque tous nos océans terrestres, la majorité des petites îles soit volcanique. La proportion des volcans est infiniment moindre à l'intérieur des aires continentales.

Loewy et Puiseux ont distingué sur la Lune trois niveaux successifs, distants entre eux de 3.000 mètres, qui sembleraient correspondre à trois étapes de la contraction, probablement séparées par d'assez longs intervalles de stabilité. Faut-il imaginer quelque chose d'analogue dans le socle volcanique que nous supposons avoir porté d'abord les sédiments terrestres? Cela se traduirait à la surface par l'existence de grands compartiments plans à divers niveaux. Or, suivant une remarque de Suess, le continent des Indes forme un plateau, au-dessous duquel le fond de l'océan Indien en offre un autre à 4000 mètres de profondeur au-dessous de la mer.

Quelle qu'en soit l'explication, il est certain qu'on observe, sur la Terre, de bien curieuses aires horizontales, aussi bien sur les continents que dans le fond des océans, où ont disparu des continents submergés. De tous côtés, nous rencontrons ainsi des plateaux qui nous apparaissent étonnamment horizontaux dès que nous les observons à quelque distance en faisant abstraction des vallées creusées ultérieurement à travers ces plateaux, ainsi que des pitons volcaniques ayant fait saillie au milieu d'eux. On a vite fait d'invoquer l'érosion, et c'est, en effet, sans doute, l'érosion qui est en cause. Mais de simples ruissellements fluviatils auraient creusé un réseau complexe de vallées. Étant donné surtout que l'horizontalité en question n'est pas le résultat d'un apport mais d'une abrasion, on est forcé de faire intervenir une force plus générale que

celle des cours d'eau, si étendus qu'on les suppose. Pour niveler la Sibérie, le Canada, le Plateau Central ou simplement le plateau de la Seine-Inférieure et celui de la Touraine, il faut que quelque phénomène puissant ait exercé son action : phénomène en rapport direct avec un niveau de la mer différent du niveau actuel et supérieur à lui.

Il existe de même, autour de nos continents, des plates-formes sous-marines attestant un ancien niveau marin qui ici aurait été plus bas que le nôtre, à une époque où le dessin général des continents était déjà tracé à peu près comme nous le voyons. Le niveau absolu des mers ayant dû vraisemblablement peu changer, si ce n'est par un abaissement progressif tenant à la fixation de l'eau dans les roches (1), on est donc conduit à penser que de vastes compartiments terrestres ont dû se déplacer dans le sens de la verticale : les uns par ascension relative, les autres par affaissement. On pourrait être amené ainsi à imaginer des descentes par échelons analogues à celles de la Lune : descentes dont l'importance, sur notre superficie terrestre, doit se trouver cachée par le grand développement des déplacements tangentiels et par les fortes saillies que sont arrivés à réaliser les plissements.

Mais ces plissements eux-mêmes, que nous avons conçus précédemment comme effectués en profondeur, n'auraient probablement pas créé de telles saillies sur la Terre si les pays contigus, les mâchoires de l'étau, entre lesquelles s'est effectuée la compression, n'avaient

(1) Je crois peu à un accroissement sensible par arrivée au jour d'eaux internes dans les épanchements volcaniques.

pas ultérieurement subi un affaissement relatif, particulièrement marqué dans l'arrière-pays autrefois prédominant et maintenant ramené parfois au-dessous du niveau marin.

III. L'INTÉRIEUR DE LA TERRE.

Les moyens qui peuvent nous renseigner sur l'intérieur de la Terre sont, les uns géologiques, les autres géodésiques ou astronomiques.

Les renseignements géologiques ne sont pas très nombreux et ne s'appliquent guère qu'à une écorce d'une trentaine de kilomètres tout au plus. Le volcanisme peut fort bien n'avoir qu'une origine presque superficielle, quoique l'étendue de certains alignements volcaniques et la durée des phénomènes conduisent à supposer en profondeur, sous l'écorce superficielle appelée la « lithosphère », des réservoirs de matières ignées d'une grande extension désignés sous le nom de « pyrosphère ». Les centres d'ébranlement sismiques ne descendent pas au-dessous de 30 kilomètres. Nos observations sur le degré géothermique correspondent à peine à 2 kilomètres de hauteur. Enfin, des raisonnements qui se présentent comme la généralisation plausible des observations géologiques superficielles, conduisent à penser que, lorsqu'on s'enfonce dans la Terre, on doit voir dominer des métaux à poids atomique de plus en plus élevé, en même temps que la teneur en oxygène décroît et que disparaissent ces deux autres corps caractéristiques de l'écorce superficielle, le silicium et l'aluminium, l'élimination du premier comportant une basicité croissante. On serait donc, de cette

manière, conduit à supposer des enveloppes successives contenant, de la périphérie au centre, sous l'écorce scoriacée qui est un silicate d'alumine : d'abord du fer avec du chrome et du manganèse; puis du cuivre; puis de l'étain, du tungstène, du platine, de l'or, du plomb; enfin du radium et de l'uranium. Ce noyau radio-actif, en contradiction avec une théorie qui limite le radium à l'écorce superficielle ou lithosphère, pourrait expliquer bien des phénomènes.

La géodésie, la physique et l'astronomie nous fournissent quelques précieux enseignements complémentaires (1), dont nous allons seulement retenir ceux pour lesquels des travaux récents ont apporté quelque progrès.

A cet égard, nous n'avons rien de nouveau à dire sur la densité de la Terre, pour laquelle Cornu et Baille ont trouvé 5,50, alors que la densité des roches superficielles est moyennement comprise entre 2 et 3 : ce qui démontre l'existence d'un noyau très dense, probablement métallique. Le résultat offre pour nous un intérêt de premier ordre; mais il est bien connu.

D'autre part, divers procédés, donnant des résultats concordants, notamment l'étude des transmissions sismiques, amènent à penser que l'ensemble de la Terre possède une élasticité analogue à celle de l'acier et l'on croit constater que son écorce rocheuse subit des déplacements constants, non seulement par dilatation calorifique, mais aussi par un véritable phénomène de marée dû à l'attraction luni-solaire. On arrive à la même conclusion par la considération des diverses

(1) Voir le chapitre IV de la *Science Géologique*, p. 93 à 124.

influences astronomiques qui agissent sur la Terre : mouvements de la Terre elle-même, rythme de ses marées océaniques et déplacements de ses pôles.

Dans un ordre d'idées un peu plus localisé, de nombreux efforts ont été tentés récemment pour chercher si des vides ou des condensations de matière apparaissaient, suivant une loi constante, en rapport avec les phénomènes orogéniques, le long de montagnes ou sous les océans. On peut utiliser les observations pendulaires, qui permettent de comparer en chaque point la gravité expérimentalement constatée avec la gravité théorique; ou encore employer deux mesures de la pression atmosphérique, dont l'une faisant intervenir le poids du mercure et l'autre indépendante de la gravité; ou enfin mettre à profit la déviation du fil à plomb qui décele l'attraction propre d'une masse locale, telle qu'une montagne, combinée avec l'ensemble de l'attraction terrestre. Dans tous les cas, on se heurte à des erreurs systématiques que, malgré leurs efforts, les géodésiens n'ont peut-être pas encore complètement levées. Si passionnante et pleine d'avenir que soit une telle étude, si fortes qu'aient été certaines affirmations, on ne semble pas avoir dépassé la période des tâtonnements incertains et des affirmations contradictoires. Ce n'est pas une raison pour ne pas continuer à chercher, bien au contraire; mais c'en est une pour ne pas craindre de signaler ces points faibles. La science gagne toujours à être débarrassée des pseudo-vérités qui l'éncombrent et qui dissimulent les limites réelles de la connaissance.

Discutons, en effet, ce qui a été dit pour cette question si intéressante et si étudiée de la densité terrestre sous les grandes montagnes et sous les océans. A cet égard,

les théoriciens arrivent à des conclusions radicalement opposées. Les uns, qui croient à « la compensation », ou à ce qu'on appelle « l'isostasie », supposent des vides sous les montagnes et un excédent de matière sous les Océans. Voici comment ils l'expliquent en attendant de le vérifier. Pour Pratt, inventeur de la *compensation*, la répartition des masses serait partout la même autour du globe; sous les saillies, il devrait donc y avoir, pour rétablir l'équilibre, un déficit de masse et, sous le creux des océans, un accroissement. Pour Dutton, l'*isostasie*, qu'il a imaginée, serait la condition d'équilibre fondamentale. Les masses sous-marines plus denses seraient les pieds-droits maintenus en équilibre par leur poussée, les voûtes surélevées des continents. Sous les grands synclinaux très anciennement dessinés, l'accumulation des sédiments amènerait un relèvement des isogéothermes, donc une plasticité facilitant à la fois l'accentuation de la dépression avec accroissement de la densité; elle provoquerait également un refoulement partiel de la matière en excès qui s'en irait des fosses océaniques surchargées de dépôts vers les continents allégés par l'érosion. On a voulu expliquer ainsi une poussée tangentielle dirigée du géosynclinal vers son avant-pays : poussée que l'on constate souvent en effet. Mais d'autres savants, au contraire, ont adopté une idée de Lippmann qui, comparant l'écorce à un navire flottant sur les matières en ignition de la « pyrosphère », en a conclu que les montagnes plus lourdes devaient s'enfoncer davantage d'après le principe d'Archimède et que par conséquent, l'écorce solide, la « lithosphère », devait être plus épaisse au-dessous d'elles. Vide pour les uns, surépaisseur pour les autres, il ne reste qu'à vérifier par l'expérimentation.

Malheureusement, les résultats des diverses mesures, tels qu'ils sont annoncés, amènent, eux aussi, à des conclusions discordantes, auxquelles il faudrait tout au moins appliquer une discussion très serrée pour éliminer une série d'influences locales et complexes.

Tout d'abord, on a cru apercevoir, sous beaucoup de montagnes, un déficit de masse, et la théorie de l'isostasie ou de la compensation sembla triompher. Dès 1849, l'astronome français Petit, constatant que la masse des Pyrénées était trop faible pour son volume, en avait conclu qu'il devait exister un vide au dessous. Des mesures faites en 1852 par Pratt au pied de l'Himalaya lui montrèrent de même que le fil à plomb était seulement dévié de 6 à 7 secondes, au lieu de 27 exigées par la théorie. Mais, quand on a continué les recherches, les phénomènes sont devenus beaucoup moins clairs et moins explicables pour un géologue. En physique, on n'est jamais si sûr d'arriver à une loi simple que lorsque le nombre des observations est restreint. Ainsi, dans les Alpes Suisses, Heim a cru trouver une curieuse corrélation entre l'intensité de la pesanteur et la tectonique. Il y aurait, suivant lui, excédent de masse sous les massifs autochtones où les parties internes plus lourdes auraient été rapprochées de la surface, diminution sous les charriages qui correspondraient à une zone affaissée, au-dessous de laquelle la matière ignée aurait été éliminée latéralement par cette pression. Ailleurs, c'est le contraste entre l'avant-pays et l'arrière-pays de la chaîne plissée qui semblerait intervenir. Le long des Carpathes, il y a excès de masse sous l'arrière-pays hongrois, déficit sous l'avant-pays. Dans les Alpes orientales, autour de l'Oetzthal, les travaux de Helmert en 1892 et les

observations ultérieures de von Sterneck entre Munich et Mantoue conduisent à admettre une caverne d'environ 1.200 mètres de haut sous le Brenner, puis un excès de masse de même amplitude au débouché sur la plaine du Pô, puis de nouveau un déficit.

Dans l'Inde, la péninsule présente peu d'anomalies pendulaires. Mais, en se rapprochant de l'Himalaya, on observe un excédent de masse qui a pu être comparé par Burrard à une chaîne invisible. Après quoi, la gravité diminue (comme on l'a constaté depuis longtemps) dans l'avant-fosse himalayenne, où ont dû s'accumuler, sur une grande épaisseur, des sédiments légers : l'attraction de la péninsule restant alors supérieure à celle de l'Himalaya, de sorte que la déviation du fil à plomb se fait vers le sud. Plus loin, cette déviation s'annule en traversant la haute chaîne et passe enfin au nord pour atteindre son maximum sur la bordure de l'Himalaya.

Ailleurs, pour des montagnes isolées comme l'Etna ou le Mauna-Kea des îles Sandwich, on a trouvé une densité trop forte à la base, trop faible au sommet. Plusieurs stations insulaires ont de même présenté un excès notable de pesanteur, auquel on a cherché les interprétations les plus ingénieuses. Dans le voisinage des côtes, le pendule a souvent aussi donné un excédent de masse, mais aussi parfois un déficit, avec cette particularité que l'ensemble d'un même rivage a pu être parfois considéré comme positif, l'ensemble d'un autre comme négatif.

Enfin, on a fait des observations en mer par la comparaison du thermomètre à ébullition (hypsomètre), qui, au moyen de tables connues, permet de déterminer la pression atmosphérique, avec le baromètre à mercure,

qui détermine la même pression en fonction d'une colonne mercurielle dont le poids varie suivant l'intensité de l'attraction terrestre. Hecker a fait ainsi, sur le trajet Hambourg-Rio et Rio-Lisbonne, vingt-neuf observations positives et trente-sept négatives. Dans ce cas, on a pu, soit appliquer le principe du suffrage universel en ne considérant que cette très faible majorité, soit chercher une interprétation locale dans la présence sous-marine de roches lourdes ou légères, soit encore se borner à dire qu'il y avait compensation moyenne entre la moindre densité de l'eau et une densité plus forte du sol. Mais il paraît plus prudent de réserver son opinion. Sur le Pacifique, la fosse des îles Tonga, où la profondeur atteint 8.500 mètres, a donné un déficit de masse important; la fosse analogue du Japon, un excédent. Dans la Méditerranée, huit mesures ont donné des valeurs négatives.

En résumé, quand on rapproche tous ces faits les uns des autres sans idée préconçue, on n'en tire qu'une conclusion à peu près nette : c'est que les anomalies systématiques semblent suivre les chaînes de montagnes ou les rivages, le long des zones disloquées qui sont aussi des zones sismiques. On reste dans l'incertitude sur la question posée relativement à l'excédent ou au déficit de masse sous les montagnes. S'il existe une loi, elle doit être bien plus complexe. Dans l'état actuel de nos connaissances, il est même difficile d'affirmer que ces anomalies observées ne tiennent pas beaucoup aux conditions topographiques et météorologiques des opérations en pays montagneux. Nous reviendrons dans un autre chapitre sur les espoirs que peut faire concevoir localement l'application de telles

méthodes à la détermination de masses métalliques cachées et, plus généralement, à l'établissement d'une géologie souterraine. Mais, avant de tirer des conclusions plus générales sur la structure interne des saillies montagneuses, on doit encore se demander si le mode expérimental et le procédé de calcul n'ont pas exercé parfois une influence égale ou supérieure à celle de la géologie. Les anomalies constatées sont à peu près du même ordre de grandeur que les erreurs expérimentales, et la discussion systématique, au moyen de laquelle on les utilise en les corrigeant, est plus spécieuse qu'utile pour des observations de ce genre. La conclusion définitive ne serait-elle pas que, dans l'état actuel de nos connaissances, les différences réelles entre la gravité théorique et la gravité pratique, tenant à une cause réellement profonde, nous échappent par leur insignifiance? Alors il n'y aurait, sous les montagnes, ni vide ni compression sensible. L'écorce terrestre serait résistante. Elle porterait les chaînes de montagnes comme une surcharge qui n'influerait pas (ou n'influerait plus) d'une manière sensible sur la distribution de ses masses profondes. Ce serait, en un mot, tout le contraire de l'isostasie, et ce ne serait pas non plus le navire flottant, mais une voûte aux voussoirs arcbutés, susceptible seulement d'oscillations élastiques, de crevasses, d'affaissements locaux et de poussées tangentielles.

Enfin, il est une dernière question dont je voudrais dire un mot, c'est le magnétisme terrestre, au sujet duquel les idées commencent à se préciser et à former un corps assez vraisemblable (1).

(1) *Science Géologique*, p. 104 à 113.

On est aujourd'hui disposé à admettre que le Soleil possède une charge électrostatique considérable; en tournant sur lui-même, il développe donc un champ magnétique, qui, tout en s'affaiblissant à la distance de la Terre, y subsiste pourtant. Le noyau conducteur de la Terre tourne lui-même dans ce champ avec une grande vitesse, et il en résulte des courants d'induction de sens équatorial. C'est comme si le globe terrestre subissait une rotation devant un rayon fixe projeté par un phare; ce rayon semblerait se déplacer en sens inverse de la rotation. Il semble, en outre, que le Soleil projette sans cesse des électrons négatifs qui, arrivant dans notre haute atmosphère, y électrisent les molécules d'air et les rendent fluorescentes en provoquant des aurores polaires et déterminent ainsi les manifestations de l'électricité atmosphérique.

On observe une coïncidence remarquable entre le passage des taches solaires au méridien, le développement des orages magnétiques et la production des aurores boréales : coïncidence d'autant plus frappante qu'elle tient compte du temps calculé pour le parcours des électrons depuis le Soleil jusqu'à la Terre, environ 45 heures. Ainsi que l'a montré l'astronome Ricco, il existe cet intervalle de 45 heures entre le passage d'une tache au méridien et le maximum d'amplitude de la perturbation magnétique.

Ce genre de recherches n'est pas seulement intéressant pour nous parce qu'il apporte une confirmation nouvelle à l'idée d'un noyau métallique enveloppé de fer à l'intérieur de la Terre. Il l'est encore plus par les périodicités qu'il accuse et par les anomalies locales du magnétisme terrestre qui peuvent contribuer à déceler des

masses métalliques ou des accidents géologiques internes.

La périodicité comprend des phases de diverses amplitudes : un jour; 27 jours un tiers, (révolution synodique du soleil); deux ans et un tiers (fréquence ordinaire des taches solaires); enfin plusieurs siècles. La météorologie étant fonction de ce magnétisme dans une large mesure, on pourrait compter retrouver la trace de cycles semblables dans les mouvements des eaux fluviales aux temps géologiques, si d'autres causes très diverses n'avaient dû intervenir à un degré supérieur. Mais on a cherché dans une voie différente en se fondant sur la permanence que paraît présenter la direction de la force magnétique à l'intérieur de certaines roches ou produits artificiels. L'argile magnétique d'un vase enregistre l'inclinaison du magnétisme terrestre au moment de sa cuisson et les observations de Brunhes faites sur des laves taillées à l'époque romaine, puis, placées en sens quelconque dans le dallage d'un temple sur le Puy-de-Dôme, semblent montrer que cette inclinaison ainsi enregistrée n'a pas été modifiée dans la suite (ici depuis le moment de la taille). Ainsi, il suffit d'examiner une poterie antique dont on connaît la date pour déterminer quelle était, à cette époque, la valeur de l'inclinaison terrestre, puisque ce vase a dû nécessairement être placé debout sur un plan horizontal dans le four de cuisson. Giuseppe Folgheraiter, qui a commencé ces études, a cru ainsi pouvoir affirmer que l'inclinaison avait été, jusqu'au milieu du 5^e siècle avant Jésus-Christ, de sens inverse à ce qu'elle est aujourd'hui, pour s'annuler à ce moment. B. Brunhes, en étudiant des argiles cuites sur place au contact des roches volcaniques d'Auvergne, a confirmé sa conclusion.

Mais on peut pousser encore plus loin dans ce sens. L'ensemble de la croûte scoriacée terrestre, de la lithosphère, doit, lui aussi, présenter, suivant les époques auxquelles remonte sa constitution, une aimantation permanente dont la direction varie avec l'âge des zones considérées. De ces diverses zones résulte une certaine composante moyenne, qui doit également présenter un caractère permanent, mais qui se superpose sans doute à l'effet produit par une zone de fer doux plus profonde, susceptible d'être aimantée temporairement dans une direction variable. Ainsi s'est constituée, dans des conditions très complexes (1), cette aimantation de la Terre, dont on constate, avec un double étonnement, la direction approximative suivant l'axe géographique actuel et le déplacement séculaire sous l'influence d'on on ne sait quelle force extrêmement puissante, en rapport avec une disposition, elle-même périodique, du système solaire et de son effet probable sur le noyau interne.

L'étude des anomalies magnétiques est d'un emploi beaucoup plus direct et plus général pour révéler la constitution interne du globe; mais, en principe, nous ne sommes ainsi renseignés que sur les zones très voisines de la surface dont l'influence, largement prépondérante, couvre les phénomènes dus à des actions plus profondes. La méthode est donc d'un usage courant pour la découverte des minerais de fer magnétique, et j'aurai à en reparler; mais elle a plus rarement fait connaître la constitution intérieure de notre globe et, dans ce cas, on n'a jamais eu le moyen, même indirect, de vérifier ses suggestions.

(1) H. Wilde a essayé de reproduire le phénomène artificiellement.

Il existe, cependant, des anomalies magnétiques bien connues des géologues, comme celle du bassin de Paris, ou celle des environs de Koursk, dont la cause doit être géologique. On ne peut s'empêcher de les attribuer à une distribution de la matière interne qui nous apporterait un enseignement analogue à celui que nous avons cherché dans les comparaisons lunaires. Certaines de ces anomalies (près de Trenton en Amérique, dans les Grampians, etc.) paraissent suivre des dislocations par failles, visibles à la surface. Il est possible que, dans les cas inexplicés, on ait affaire à des failles invisibles, mettant en contact des roches et terrains de constitutions chimiques entièrement différentes.

CHAPITRE V

Métallogénie et Sources thermales.

- I. LES TYPES RÉGIONAUX DE GITES MÉTALLIFÈRES. —
II. LES RELATIONS DES SOURCES THERMALES AVEC
LES MOUVEMENTS OROGÉNIQUES LES PLUS RÉCENTS.

Les deux sujets que je rapproche dans ce chapitre présentent entre eux une étroite solidarité. Toute la théorie des gîtes métallifères filoniens est fondée, en effet, sur leur assimilation avec des circulations hydrothermales qui se sont trouvées chargées de vapeurs métalliques par la proximité des roches ignées en fusion, d'où ces vapeurs se dégageaient. L'étude des filons anciens apprend donc à connaître ce qui peut se produire, aujourd'hui encore, dans les profondeurs des sources thermales, inabordables à notre exploration directe; et, d'autre part, les lois qui régissent la localisation de nos sources thermales actuelles apparaissent, en quelque mesure, applicables à la localisation ancienne des sources analogues qui ont incrusté des filons.

La théorie des gîtes métallifères et celle des sources thermales ont été récemment reconstituées et un grand nombre des questions qui y sont abordées pourraient être considérées comme nouvelles. Je n'en retiendrai ici que deux, toutes les deux de nature à nous faire prévoir les types de minerais métallifères ou de richesses

hydrothermales susceptibles d'exister dans un pays encore inexploré et, par conséquent, particulièrement utiles à retenir dans la pratique pour diriger des recherches difficiles et des efforts coûteux.

I. LES TYPES RÉGIONAUX DE GITES MÉTALLIFÈRES (1).

Les divers gisements métallifères d'une région déterminée présentent, entre eux, certaines analogies et comme un air de famille qui les distinguent aussitôt des types représentés dans une autre région. C'est ce que j'ai appelé leur type régional. Ce type régional se retrouve à peu près le même quand on aborde, à la surface du globe, des régions plus ou moins éloignées les unes des autres, mais dont les mouvements orogéniques appartiennent à la même phase géologique et dont la tectonique est semblable. Il apparaît, au contraire, tout à fait différent si l'on étudie deux régions, même très voisines, dont les plissements se rattachent à deux époques distinctes. En conséquence, sur l'étendue du continent euro-asiatique, où les plissements sont en moyenne dirigés est-ouest, quand on se déplace suivant la longueur d'un plissement, on rencontre, à des milliers de kilomètres de distance, des gisements de même type; tandis que, si on marche, transversalement à la longueur des plis, dans le sens nord-sud qui amène à traverser successivement des chaînes d'âges de plus en plus récents du nord au sud, on assiste, en même temps, à une transformation extrêmement rapide des types régionaux.

(1) J'ai eu l'occasion de résumer quelques-unes de ces idées dans une conférence pour le centenaire de l'École des Mines.

La conséquence pratique, que l'on peut énoncer en deux mots, est que, pour prévoir le type métallifère d'une région, il suffit de connaître l'ensemble de sa tectonique, sans avoir besoin de posséder d'abord aucune notion plus précise sur les gisements eux-mêmes. On sait ainsi d'avance, en abordant un pays nouveau, quels types métallifères on doit s'attendre à y rencontrer et on est en droit d'y chercher, quels autres types ne sauraient y exister.

Ce que nous disons là pour les gîtes métallifères s'applique également aux types de roches ignées. On reconnaît l'existence de provinces pétrographiques comme on constate la présence de provinces métallifères, et leur répartition obéit aux mêmes lois. La relation d'origine que nous admettons entre les minerais et les roches ignées rend cette corrélation particulièrement démonstrative et typique. Deux régions de même tectonique, ayant subi en même temps leurs derniers plissements, présentent à la fois les mêmes roches et les mêmes minerais, roches et minerais dépendant les uns des autres.

Si, avant d'examiner le fait plus en détail, nous en cherchons la cause première, nous sommes conduits à y voir, en principe, une conséquence de la profondeur originelle. La raison essentielle pour laquelle deux régions plissées ensemble offrent simultanément une même allure tectonique, les mêmes facies pétrographiques et d'analogues minerais, c'est que tous ces phénomènes dépendent de la profondeur originelle à laquelle se trouvait autrefois la zone de l'écorce terrestre que les érosions, succédant aux mouvements du sol, ont amenée, en ce point, à être aujourd'hui superficielle.

En deux mots, nous nous représentons, sur une même coupe verticale de la lithosphère, dans une région donnée, les facies de plissements, de roches et de minerais se superposant les uns aux autres dans un ordre théorique qui a dû se reproduire à peu près pareillement dans les diverses phases orogéniques successives. Après quoi, l'on peut concevoir les progrès de l'érosion comme ayant opéré des coups de rabot, en vertu desquels des coupes horizontales de plus en plus profondes se sont trouvées mises à nu, de manière que l'une ou l'autre d'entre elles constitue aujourd'hui la zone d'affleurements. Étant donné qu'en deux régions différentes, les superpositions ont commencé par être les mêmes et que, dans l'une, l'érosion a accompli un seul stade, tandis qu'elle a traversé deux étapes dans l'autre, tout se passe comme si la seconde région nous offrait une coupe horizontale inférieure à celle que nous rencontrons dans la première : coupe horizontale, qui serait à son tour mise à nu dans cette première région si nos travaux de mine permettaient de s'y enfoncer suffisamment.

Cette théorie s'oppose, on le voit, à l'empirisme qui se borne à constater l'existence de tel ou tel minéral dans telle ou telle région comme un fait expérimental dont il est inutile de chercher l'explication; elle n'admet pas que l'un ou l'autre de ces minerais soit un fait accidentel, dû à ce qu'on appelle par ignorance le hasard et que le métal rencontré dans une partie d'un filon soit totalement indépendant de celui que l'on recueille dans une autre zone du même filon, ou encore dans un filon voisin. Nous croyons, nous, que, dans une région déterminée, s'il existe, à la fois, du plomb, du zinc, du cuivre, de l'argent, du mercure, tous ces métaux sont liés les

uns aux autres par leurs conditions d'origine et que les formes mêmes de leur cristallisation, de leur groupement, de leur répartition, sont fonction de cette origine.

Cela ne veut pas dire, bien entendu, qu'on ne puisse pas rencontrer, à la fois, dans la même région, des indices de deux mouvements orogéniques successifs, traduits par des roches et des minerais appartenant à la fois à l'un et à l'autre. Il en résulte une certaine complication apparente que l'on doit s'attacher à débrouiller dans la pratique; mais cette complication est tout à fait analogue à celle qui rapproche, dans le même massif hercynien, des granites siluriens, des microgranites carbonifères et des laves tertiaires : chacun de ces types pétrographiques avertissant, par sa structure même, qu'il a cristallisé plus ou moins profondément et que cette cristallisation est plus ou moins ancienne. Pour les roches, les types de profondeur se traduisent, en moyenne, par une homogénéité de cristallisation qui aboutit au type granitique; au contraire, pour passer de suite à l'autre cas extrême, les roches d'épanchements laviques, qui ont récemment coulé sur la surface du sol, présentent la structure bien connue des pâtes microlithiques englobant des cristaux plus volumineux de première consolidation. La relation du type métallifère avec la profondeur originelle est tout aussi nette; et l'on peut ajouter qu'elle comporte des exceptions du même ordre, pour la même raison, parce que des conditions indépendantes de la profondeur ont pu, dans certains cas particuliers, réaliser des phénomènes analogues à ceux qui sont plus généralement produits par l'effet de cette profondeur.

En résumé, dans la métallisation d'une région, on est amené à faire intervenir trois causes principales.

1° La première dont on observe l'influence est la composition du magma fondamental qui s'est trouvé en former le substratum. Absolument comme nous avons des provinces rocheuses à prédominance potassique ou sodique, nous rencontrons aussi des régions dans lesquelles le

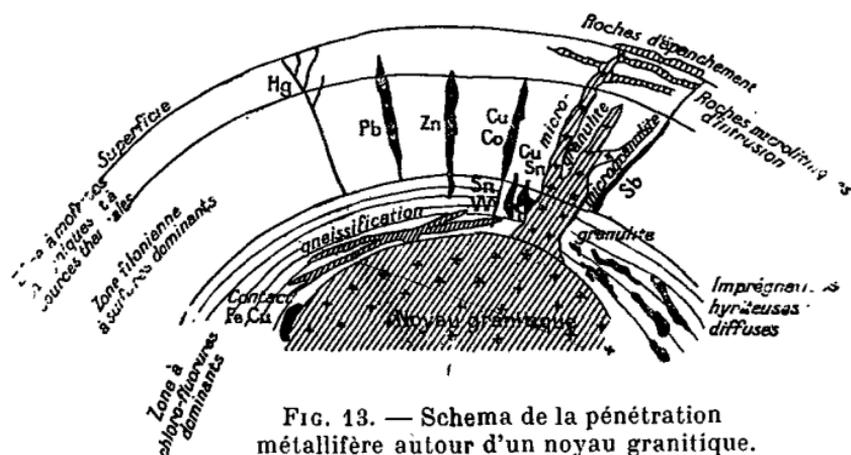


FIG. 13. — Schéma de la pénétration métallifère autour d'un noyau granitique.

magma fondamental a dû, dès la consolidation de la lithosphère et en raison des conditions qui ont présidé à cette consolidation, renfermer une abondance particulière de plomb, de zinc, de cuivre ou de mercure. Après quoi; 2° les mouvements tectoniques subis par la région ont eu pour conséquences principales : l'introduction de magmas différenciés d'une composition et d'une structure déterminées; puis l'ouverture de dislocations appartenant à un certain type; enfin un retour en profondeur ou une remontée au jour plus ou moins accentués. Enfin, 3° comme je viens de l'expliquer, le temps, depuis lequel ces mouvements ont été opérés, a exercé

une influence décisive, par l'intensité des érosions qui en a été la conséquence et par la profondeur de la coupe horizontale qui s'est trouvée superficiellement mise à nu.

Cherchons maintenant l'application un peu détaillée de ces idées et voyons d'abord quelle est la relation du type métallifère avec le type pétrographique connexe et avec la distance du gisement à la roche ignée. Nous aborderons ensuite le rapport avec la tectonique.

On peut se représenter, sur un schéma exagérément simplifié, tel que celui de la figure 13, un noyau granitique occupant la zone profonde, à partir de laquelle se succèdent, en rapport avec l'éloignement croissant, les divers types pétrographiques et métallifères. La mise en place des magmas granitiques est généralement liée au métamorphisme régional dont résultent les formes de terrains dites cristallophylliennes (gneiss, mica-schistes, etc.). Après quoi, on voit d'abord se différencier des granulites à mica blanc, puis des microgranites, remplissant des fractures ou des zones intrusives de plus en plus localisées. Ensuite, si on continue à s'éloigner du foyer igné profond, on voit apparaître la série des types rocheux qui se relie aux manifestations éruptives plus ou moins superficielles : on trouve le groupe des andésites, des trachytes, des basaltes, etc., et, enfin, à la surface même, sous la forme de coulées laviques, les types les plus récents des mêmes roches.

Reprenons la série dans le même sens pour chercher les types métallifères qui se rattachent à ces diverses zones pétrographiques; nous observons également, pour eux, un ordre théorique.

Tout d'abord, dans les terrains métamorphiques à facies cristallophyllien, dominant les groupes de gisements que

j'ai décrits sous le nom « d'imprégnations diffuses » : en premier lieu, des imprégnations pyriteuses, parfois avec légère teneur en cuivre ou en or, occupant tous les interstices des feuilletts schisteux, moulées sur eux de manière à former une roche zonée, alternativement composée de pyrite et de schistes, ou encore groupés en amas tout à fait assimilables aux amas granitiques eux-mêmes, amas visiblement cristallisés dans les conditions d'homogénéité que réalise seule la profondeur. Pour ce genre de gisements, c'est à peine si l'on est amené à supposer une faible influence des principes volatils, des fumerolles, de la pneumatolyse, qui sont intervenues si puissamment dans les autres groupes de gisements pour prêter de la mobilité aux métaux. On a affaire à un phénomène d'ordre presque exclusivement igné et assimilable à la cristallisation des magmas pétrographiques eux-mêmes.

Au contraire, si nous envisageons la série rocheuse qui commence aux granites à mica blanc (granulites) pour aboutir aux laves volcaniques, nous assistons à un départ de plus en plus accentué des métaux dans l'ordre de leur solubilité sous l'influence de divers réactifs chimiques et, plus généralement, de leur mobilité. Pour nous borner aux termes essentiels, nous partons de l'étain pour passer au cuivre, au zinc, au plomb, à l'argent et enfin au mercure.

L'étain, par lequel nous commençons, est, dans la série considérée en ce moment, le métal profond, relié à ces roches de profondeur que sont les granites à mica blanc : roches dans lesquelles, cependant, l'influence des principes volatils sur la cristallisation est manifeste. L'étain s'est fort peu éloigné de ces granites spéciaux auxquels le relie une communauté d'origine. Ses filons

sont d'un type généralement confus et qui rappelle les filons de granulite eux-mêmes. Ils prennent rarement la forme de fractures distinctes, nettement filoniennes, qui est particulièrement favorable à la continuité des exploitations métallifères et qui, précisément parce qu'elle est rare pour l'étain, prête aux gisements où on la rencontre une valeur exceptionnelle. A l'étain sont communément associés plus ou moins intimement un certain nombre de métaux dont les conditions de cristallisation ont été analogues et ont généralement nécessité l'intervention de fumerolles chlorurées, tels que le tungstène, le bismuth ou, accessoirement, le molybdène, avec des minéraux comme la fluorine, la cryolite, les phosphates d'alumine ou de chaux, etc.

En raison des conditions que nous venons d'analyser, les gisements stannifères se trouvent toujours localisés dans les massifs anciens, où l'érosion a eu le temps de mettre à jour la granulite : tout particulièrement dans les massifs hercyniens qui correspondent par leur âge au cas le plus habituel dans lequel ces conditions d'érosion aient été réalisées. On y trouve alors les gîtes d'étain formant une auréole autour des massifs granulitiques, à peu de distance de ceux-ci.

Avec l'étain commence parfois à se montrer le cuivre, quand l'étain a pu, exceptionnellement, s'éloigner davantage de la roche mère et se localiser, sous l'influence des principes volatils, dans des fractures mieux caractérisées. C'est dans les vrais filons d'étain à cassure nette et régulière que l'on rencontre le plus habituellement l'association de cuivre et d'étain, qui caractérise, par suite, quelques grands gisements stannifères du monde. Mais, peu à peu, quand on s'éloigne vers une

auréole plus distante du magma igné originel, on assiste à la disparition de l'étain; en même temps qu'au cuivre commencent à s'associer le zinc et le plomb. On passe alors à la zone des filons concrétionnés proprement dits, dont la relation avec des roches ignées est souvent assez lointaine pour devenir quelque peu problématique : zone dans laquelle les facies rocheux sont représentés de préférence par le type des microgranites.

Puis, restant toujours dans le groupe des filons proprement dits, mais s'éloignant horizontalement de la roche granitique, ou, ce qui revient au même en coupe verticale, se rapprochant de la superficie, on voit le cuivre disparaître à son tour et, progressivement, il arrive que le minerai devienne plus argentifère; puis, que des traces de mercure s'associent avec le plomb.

On aboutit ainsi, comme terme extrême, opposé au type de l'étain, à des gisements mercuriels, dont la cristallisation a pu se poursuivre jusqu'à la surface même, ce métal étant particulièrement soluble et mobile, et qui représentent, par conséquent, le type métallifère le plus éloigné des granites, en même temps que le plus rapproché de la surface.

Ainsi en deux mots, les types régionaux qui correspondent à une cristallisation ancienne et à des formes de profondeur nous offriront de préférence des imprégnations diffuses de pyrite aurifère ou cuivreuse; les massifs hercyniens, dans lesquels les granites ont été partiellement mis à nu nous présenteront, sous la forme filonienne, la succession étain, cuivre, zinc et plomb; les dislocations superficielles d'âge tertiaire, souvent connexes avec la proximité du volcanisme, nous donneront encore du plomb, mais en même temps du mercure,

et souvent une abondance particulière de métaux précieux.

Dans la théorie précédente, nous avons attaché une importance particulière à la profondeur originelle des gisements : profondeur qui, autour d'un noyau granitique à forme grossièrement hémisphérique, peut se traduire par des auréoles successives représentant l'affleurement de sphères de plus en plus distantes. Cela revient à admettre qu'un type de gisement et un type de remplissage métallifère sont limités dans les deux sens, en haut et en bas. Quand on rencontre ce type de minerais dans un affleurement filonien, on doit en conclure que la superficie actuelle où cet affleurement se présente correspond, par l'effet des érosions subies depuis la cristallisation, à la profondeur convenable pour que cette cristallisation ait pu se réaliser. Mais, à l'époque où le minerai en question a été formé, ces conditions favorables ne se prolongeaient indéfiniment ni vers le haut ni vers le bas. Dans les deux sens, il arrivait vite un moment où, ni le même système de dislocations et de vides ne pouvait s'ouvrir, ni, dans ce vide une fois ouvert, la même dissolution métallifère ne pouvait cristalliser. Contrairement à ce qu'on imagine souvent, un filon n'a pas été, au moment de sa formation, indéfiniment prolongé suivant la verticale, pas plus qu'il n'était illimité suivant la direction horizontale. Si nous sommes souvent amenés dans la pratique à négliger cette limitation d'ordre théorique, c'est parce que nos exploitations portent à peine sur quelques centaines de mètres de hauteur et que les zones dont nous nous occupons ici ont dû atteindre des dimensions notablement supérieures. On conçoit néanmoins que, si la profondeur ori-

ginelle représentée par la superficie actuelle correspond presque à la limite d'une certaine zone filoniennè métallifère, il suffira alors de s'enfoncer fort peu dans le filon pour en rencontrer la limite, ou pour voir les types de métallisation tendre à se modifier.

C'est un ordre de faits qui est généralement masqué par l'influence prédominante des altérations superficielles dues aux métasomatoses, (dont il a été dit un mot dans un chapitre antérieur (1), et que, par conséquent, on est souvent porté à négliger, mais qui n'en existe pas moins et qui ne doit pas moins entrer en ligne de compte. Certains types régionaux de gisements plombeux paraissent ainsi comporter une limitation fâcheuse de tous les filons à une profondeur déterminée.

Nous venons d'insister ici sur la relation du type métallifère avec le type pétrographique. Le type pétrographique à son tour étant fonction de la tectonique, on peut présenter cette énumération sous une autre forme, qui mettra peut-être mieux encore en évidence la possibilité de prévoir le type régional de gisements métallifères dans une région à peine explorée et presque inconnue. Il suffit, en effet, d'une exploration bien sommaire pour reconnaître si la région en question se présente, par exemple, sous la forme d'un plateau primaire, dans lequel les terrains secondaires ou tertiaires, en admettant qu'ils existent, sont restés horizontaux; ou, au contraire, si l'on a affaire à une chaîne plissée, généralement à une chaîne montagneuse actuelle, dans laquelle les terrains tertiaires eux-mêmes apparaissent bouleversés, plissés et redressés.

(1) Page 29.

Or, les massifs les plus anciennement consolidés du globe, ceux qui, dans notre hémisphère, forment une première auréole boréale autour du pôle arctique, présentent un type de gisements en rapport avec cette profondeur de cristallisation, qui assimile aussitôt le Canada, la Scandinavie, la plus grande partie de la Sibérie, ou, dans l'hémisphère austral, le Brésil et les Guyanes, l'Afrique centrale et une partie de l'Inde (1).

Ces régions de massifs anciens accusent une prédominance du métamorphisme régional cristallophyllien, que nous avons rattaché lui-même à un retour général de toute la région en profondeur, à une sorte de cuisson en vase clos sous un épais couvercle de terrains aujourd'hui disparus. La gneissification est ici accompagnée, comme je l'ai dit précédemment, par des *imprégnations diffuses*, dans lesquelles la pyrite peut être enrichie de cuivre et d'or, ou contenir parfois un peu de zinc ou de plomb. Dans la même zone approximative, nous rencontrons également des laccolithes basiques à structure homogène, à consolidation simultanée, à l'intérieur desquels ont pu s'opérer des *ségrégations oxydées*, à la façon des différenciations que subissent nos alliages métalliques et que l'on a tant de peine à empêcher dans nos hôtels des monnaies. Avec ces ségrégations ont pu s'isoler, comme minerais, des magnétites, souvent titanifères, ou des fers chromés. Enfin, sur la périphérie des mêmes noyaux basiques (la basicité étant, en principe, corrélative de la profondeur), un commencement de phénomènes volatils a pu donner des *gîtes sulfurés de départ*

(1) Voir la Planche I de la *Science Géologique*, où ces zones ont été mises en évidence par des couleurs appropriées, ou le croquis par lequel nous avons essayé d'en donner une idée (fig. 10, page 56).

immédiat, où domineront le cuivre et le nickel. Tels sont les gisements que l'on peut s'attendre à trouver, sans sortir d'Europe, en Scandinavie ou en Finlande. Au contraire, dans les régions de ce genre, les filons sont rares; et lorsqu'ils apparaissent, c'est en relation probable avec des dislocations plus récentes qui ont affecté le bord de ces massifs, de même que l'on trouve, dans la chaîne hercynienne, des indices très-nombreux, souvent très importants, de dislocations tertiaires.

En second lieu, avec une profondeur d'érosion moindre portant sur une zone de consolidation moins ancienne, telle que celle habituellement réalisée le long de la chaîne hercynienne, on voit apparaître au jour, en grande quantité, des roches acides formant une scorie plus légère et plus haute que les roches basiques, prédominantes dans la zone précédente; et, autour de ces roches acides, on voit se développer les minerais des métaux qu'elles entraînent habituellement, tels que l'étain et son groupe, puis le cuivre et parfois l'or. C'est ainsi que les *gisements de départ acide immédiat*, dont les métaux appartenant au groupe de l'étain forment les éléments les plus caractéristiques, se trouvent être particulièrement représentatifs de la chaîne hercynienne. Avec les stockwerks stannifères et les métaux du même groupe, tels que le tungstène, le bismuth et l'or, on trouve, dans les massifs hercyniens, des masses d'oxyde de fer associées à des roches acides ou neutres, des filons de mispickel et des filons de stibinc. Tous ces métaux, à coup sûr, peuvent également se rencontrer, suivant une remarque antérieure, dans des chaînes, ou plus anciennes, ou surtout plus récentes; ils y sont beaucoup plus exceptionnels. De même, dans les chaînes hercyniennes, on

peut voir apparaître des types de gisements qui deviendront représentatifs des chaînes plus jeunes. Des fractures filoniennes minéralisées en zinc et en plomb existent en grand nombre dans ces massifs anciens, non seulement par suite de redislocations tertiaires qui y sont tout à fait fréquentes, comme nous allons le dire, mais même par l'effet de fractures correspondant à la formation de ces massifs eux-mêmes.

Citons, comme exemples bien typiques de telles manifestations métallifères hercyniennes, le Cornwall et l'Armorique, la Meseta Espagnole, le Massif Central, les Vosges, le Harz, la Bohême, l'Oural et l'Altaï. Le Cornwall, à peu près exempt de mouvements tertiaires, offre surtout, autour de massifs granitiques, des auréoles successives présentant : d'abord de l'étain et du tungstène; puis, en même temps, du cuivre de plus en plus abondant; enfin, du plomb et du zinc associés. Dans la Meseta Espagnole, comme dans nos massifs hercyniens français ou dans ceux d'Allemagne et de Bohême, on rencontre le groupe de l'étain, et celui de l'antimoine. Mais les filons plombo-zincifères prennent la prédominance et se divisent en deux groupes. Les premiers, les plus rares, sont eux-mêmes d'âge hercynien, comme le prouve parfois leur recouvrement par un manteau de terrains secondaires; des épanchements métallifères, tantôt plombo-zincifères, tantôt cuivreux, s'y associent et ont porté parfois sur les terrains permo-triasiques qu'ils ont incrustés ou imprégnés de minerais. D'autres filons du même genre, beaucoup plus nombreux, sont en rapport avec les fractures tertiaires qui ont si souvent redisloqué les massifs hercyniens et se montrent d'autant plus abondants que l'on aborde les zones où, de toutes manières,

par des fosses d'effondrement, par des volcans, etc., s'accusent ces redislocations tertiaires.

En principe, la plus grande partie des filons métallifères proprement dits doivent être considérés comme d'âge tertiaire, et nous amènent à envisager le dernier groupe de formations métallifères en rapport avec les plissements montagneux de cette période. C'est la généralisation d'une loi que nous énoncerons bientôt à propos des sources thermales et qui localise la plus grande partie de ces sources thermales actuelles dans des régions ébranlées et disloquées par des mouvements récents. Ainsi que nous l'avons dit, cela nous paraît correspondre, non pas à ce qu'il ne s'est pas formé plus anciennement de filons du même genre, à ce qu'il n'a pas existé précédemment de sources thermales semblables pour les minéraliser, mais à ce que le phénomène filonien est, par sa nature même, un accident relativement superficiel, en sorte que ses traces disparaissent dès que l'érosion a fait affleurer une section horizontale un peu profonde de la chaîne considérée.

On peut ajouter que la majeure partie de ces filons tertiaires ne se rencontrent pas dans l'intérieur des chaînes plissées rattachées à la même période, qui forment les principales chaînes orographiques du globe. Dans de telles chaînes, il existe bien des filons, mais pour la plupart morcelés, inconsistants et, par conséquent, de faible valeur pratique. La chaîne plissée représente pour nous une portion trop élevée des mouvements orogéniques, comme la zone de profondeur à métamorphisme régional, telle qu'elle a eu le temps d'apparaître sur les massifs primaires, constitue, au

contraire, une zone trop profonde. Il faut, pour observer de beaux filons métallifères réguliers et continus, avoir affaire à une zone intermédiaire, qui est généralement celle des massifs hercyniens redислоqués par les fractures tertiaires, ou, mieux encore, celle des manifestations ignées intrusives que l'on peut rattacher à la profondeur des zones volcaniques supracrétacées ou tertiaires.

En ce qui concerne le volcanisme, la remarque est la même que pour les plis. Le volcanisme superficiel, avec son appareil connu de cratères, de projections cendreuse et d'épanchements laviques, apparaît, en principe, trop superficiel pour les métallisations. Si l'on veut rencontrer celles-ci, on doit descendre plus bas; et ce n'est pas sur les volcans en activité qu'on les découvre, ni à leur proximité immédiate, c'est sur les zones à volcanisme depuis longtemps éteint, par conséquent à érosion déjà avancée, telles qu'on les observe de préférence là où ce volcanisme remonte à l'époque crétacée, ou, du moins, au début de l'époque tertiaire.

Sur les zones propices à ce genre de métallisation, il est arrivé de pouvoir exploiter de beaux districts métallifères à nombreux filons entassés dans un champ parfois restreint, où s'est accumulé un extraordinaire effort mécanique, prolongé et renouvelé pendant plusieurs périodes géologiques successives. On trouve aussi, dans les mêmes régions, d'immenses filons continus, des zones de décrochement, de glissement et de broyage, parfois prolongées sur des dizaines ou même des centaines de kilomètres, avec un remplissage quartzeux englobant et cimentant des éboulis des roches encaissantes. La minéralisation de tels filons est, ordinairement, constituée

de préférence par le groupe sulfureux du fer, du plomb, du zinc et du cuivre; mais on voit aussi les métaux précieux, or et argent, y prendre un développement, qui en fait industriellement, sinon minéralogiquement, l'élément principal.

Enfin, l'on observe, dans certains quartiers à roches volcaniques relativement profondes, des gisements d'un autre genre directement reliés avec ces roches, des fissures de retrait ou de multiples petites fractures minces et inconsistantes, qui ont pu constituer néanmoins des champs métallifères de grande valeur, quand la métallisation y était surtout constituée par des métaux précieux.

Les divers types que je viens d'énumérer ont leurs représentants principaux hors d'Europe, dans l'Ouest Américain, le Mexique, le Japon, les Célèbes, etc... En Europe, nous en possédons un spécimen intéressant dans les grands districts métallifères de Hongrie qui se particularisent par l'association de minerais siliceux, souvent auro-argentifères, avec des roches d'épanchement. Les districts de Schemnitz et de Kremnitz offrent des exemples classiques de ce type. Vers l'est, à Nagy-Banya ou Zalatna, on trouve, en outre, un système de filons aurifères, avec fréquente association tellurée qui rappelle des types connus du Colorado.

Enfin, nous sommes ainsi amenés peu à peu à envisager les formations tout à fait récentes et superficielles, soit qu'il s'agisse du volcanisme actif, soit qu'on aborde les montagnes récemment plissées comme les Alpes et les Pyrénées. Dans les deux cas, je viens de le dire, contrairement à un préjugé très fréquent qui tend à associer l'idée de minerais avec celles de montagnes et de

volcans, les gisements productifs sont rares. Dans les champs volcaniques actifs, on ne peut guère citer comme métaux utilisables que le mercure, regardé par nous comme le plus superficiel des métaux, ou l'arsenic et le fer. Les montagnes tertiaires nous offrent plus de variété; mais il faut y distinguer avec soin les zones anciennes accidentellement ramenées au jour qui sont, en réalité, de simples noyaux hercyniens englobés dans une chaîne tertiaire, ou les parties de la chaîne elle-même, suffisamment érodées pour avoir laissé mettre à nu quelques métallisations. On observe, par exemple, dans les Pyrénées, un système très général de filons-couches inconstants et disloqués, renfermant l'association ordinaire du fer, du zinc et du plomb sulfurés. Ces filons ont pu prendre de la valeur quand ils contenaient une grande abondance de pyrite ferrugineuse que la métasomatose a transformée en carbonate ou en oxyde de fer et rendue ainsi utilisable. Ailleurs, on a pu recouper, dans la même chaîne, des renflements locaux suffisants pour fournir quelques masses utiles de galène ou de blende. Mais les métallisations les plus intéressantes sont celles qui ont rencontré une roche écaissante calcaire et qui, grâce à celle-ci, ont donné de larges amas de calamine ou de sidérose.

II. LES RELATIONS DES SOURCES THERMALES AVEC LES MOUVEMENTS OROGÉNIQUES LES PLUS RÉCENTS.

Les sources thermales sont nombreuses et leurs applications commerciales conduisent, sinon à en multiplier le nombre, du moins à éviter de les négliger. L'emploi que l'on fait des eaux en médecine ou en hygiène n'est

pas, d'ailleurs, restreint aux sources thermales. Il suffit qu'une eau froide renferme avec quelque abondance un principe chimique utile ou, au contraire, qu'elle semble tout particulièrement exempte d'aucun principe chimique, pour qu'on songe à l'exploiter. Il en résulte que, lorsqu'on envisage la répartition des sources thermominérales sur une carte exécutée avec un but d'emploi thérapeutique, la loi que nous voulons étudier dans ce chapitre peut se trouver un peu masquée au premier abord; elle devient, au contraire, d'une netteté extrême si l'on se borne aux sources réellement thermales, aux eaux d'origine profonde dont la température moyenne excède sensiblement la moyenne du lieu.

Il apparaît alors, dès le premier examen, que les sources chaudes sont extrêmement abondantes dans certaines régions, comme la zone méditerranéenne en Europe, alors qu'elles sont d'une rareté extrême en Angleterre, en Scandinavie, en Russie septentrionale. Le même contraste existe entre la bordure algérienne ou marocaine de l'Afrique et la grande masse du continent Africain, entre l'ouest et l'est des États-Unis, entre la Sibérie et le Japon.

Si l'on en cherche la cause, on peut songer à l'intervention des chaînes montagneuses, à celle du volcanisme, à une latitude plus ou moins septentrionale, etc... Chacune de ces raisons présente une apparence de vérité, mais seulement dans la mesure où elle-même correspond avec la raison réelle qui est, je l'ai annoncé précédemment, la localisation des sources thermales sur les zones à dislocations tertiaires (1).

(1) On trouvera le développement de ces idées dans un article publié par la *Revue générale des Sciences* le 15 juillet 1898 sur la « distribu-

Ces zones à dislocations tertiaires sont, en effet, à peu près les mêmes, où se sont produits les mouvements orogéniques traduits par des chaînes montagneuses, celles aussi où le volcanisme est encore le plus actif; et, enfin, en ce qui concerne la situation plus ou moins septentrionale, nous savons que les mouvements orogéniques d'Europe se sont progressivement écartés du Pôle Nord, en sorte que les plus récents sont, en même temps, les plus méridionaux, les plus voisins de la zone méditerranéenne. Mais il y a, en cela, simple coïncidence, ou plutôt effets concordants d'une même cause. Là où l'on rencontre des montagnes non plus tertiaires, mais primaires, comme les monts Scandinaves ou l'Oural, le relief de ces chaînes ne les rend pas plus riches en sources thermales. Le volcanisme ne joue certainement aucun rôle dans la grande abondance des sources thermales que l'on trouve le long des Alpes. Enfin, si l'on voulait chercher un rapport direct entre l'abondance des sources thermales et la latitude, il ne faudrait pas oublier que les phénomènes sont inversés dans l'hémisphère austral, où l'on trouve des dislocations tertiaires avec eaux chaudes et volcanisme jusqu'aux abords de l'Antarctide. Par contre, l'Islande et le Kamschatka, quoique occupant une position septentrionale dans notre hémisphère, présentent des eaux chaudes abondantes, côte à côte avec les massifs du Groënland, de la Scandinavie ou de la Sibérie, dans lesquels ces manifestations font défaut.

Avec plus de précision, la loi qui règle la distribution géographique des sources thermales peut s'énoncer

tion géographique des sources thermales », ou, avec plus d'extension, dans mon *Traité des sources thermominérales* (Béranger, 1898).

ainsi : « Les sources thermales sont en relation avec les phénomènes de dislocation les plus récents de l'écorce terrestre (plissements ou effondrements) et localisées dans les zones assez étroites de la Terre, où ces derniers phénomènes se sont fait sentir. » La France et son prolongement africain appartiennent, pour la plus grande partie, à de telles zones. Ce n'est pas une raison parce que nous sommes riches, pour que nous méconnaissions le caractère un peu exceptionnel de notre richesse. Il est, au contraire, utile que notre attention soit attirée sur le privilège dont nous jouissons, au même titre que d'autres pays de l'Europe méridionale ou centrale, pour apprendre davantage à en tirer parti.

Avant d'aller plus loin et de préciser, je crois utile de résumer la manière dont nous pouvons concevoir la production d'une source thermale : source due, suivant nous, non pas comme on l'a trop souvent supposé, à un phénomène interne d'origine mystérieuse, mais, dans la grande majorité des cas, à un simple circuit souterrain d'eaux infiltrées d'abord à la superficie, puis descendues lentement et en s'échauffant par un réseau de fissures minces souvent presque capillaires, pour remonter ensuite brusquement et rapidement par une fracture largement ouverte. Le fait caractéristique de la source thermale est, suivant nous, l'existence de cette large cassure ouverte descendant à 1.000 ou 2.000 mètres de profondeur : cassure qui se trouve jouer le rôle d'un tuyau vertical étanche aboutissant directement à un ou deux kilomètres de profondeur, dans une nappe d'eau échauffée et maintenue sous une forte pression hydrostatique. Si cette fracture ne se présentait pas, la nappe d'eau chaude, n'en existerait pas moins

en profondeur; mais, comme elle ne présenterait aucune communication directe avec la superficie, nous n'en aurions pas connaissance; et, si une partie de cette eau remontait au jour par un autre circuit aussi compliqué et aussi lent que celui ayant servi à sa descente, elle reperdrerait dans son ascension toute la chaleur acquise au préalable en descendant.

J'ai fait autrefois le calcul que, sur la source de Bourbon-l'Archambault (Allier), l'eau remontait de 1.500 mètres de profondeur avec une vitesse d'environ 10 mètres par seconde, correspondant à un débit de 3.000 centimètres cubes par seconde pour une section de 300 centimètres carrés (2 centimètres sur 1^m,50 de long). La remontée peut donc prendre 4 heures, tandis que la descente avait pu durer 6 mois et s'effectuer avec une vitesse au moins trente fois moindre par un réseau fissuré de section totale égale à environ 1 mètre carré.

L'explication que je viens de donner et qui n'est pas admise de tous n'intervient en rien dans la démonstration de la loi précédemment dénoncée. Cette démonstration résulte simplement, comme il est aisé de le voir par une étude géographique, de l'observation et de l'examen spécial des régions hydrothermales, entrepris en vue d'y rechercher les accidents dynamiques; mais, une fois la loi constatée, notre théorie va nous permettre d'en comprendre la cause. Car, pour qu'il y ait retour rapide à la surface d'une grande masse aquifère, préalablement échauffée et, par suite, minéralisée pendant son trajet souterrain, il faut, je viens de le remarquer, qu'il y ait large fracture ouverte, et ces fractures ne sont restées ouvertes que dans les régions

récemment disloquées, parce que, partout ailleurs, où elles sont d'âge plus ancien, elles ont été déjà comblées, soit par les éboulis tombés des parois, soit surtout par le passage même des eaux souterraines.

La loi admise, on voit de suite les conclusions générales qui peuvent en résulter.

En premier lieu, l'existence d'une source thermale en un point montre qu'il s'est produit, en ce point, un accident dynamique récent, qui pouvait se trouver d'ailleurs masqué par quelque circonstance superficielle et invite, dès lors, le géologue à faire de la région voisine une exploration particulièrement scrupuleuse pour découvrir les contrecoups que cet accident n'a pu manquer d'avoir sur les terrains encaissants.

En second lieu, si l'on se rappelle ce que nous avons dit précédemment sur la formation des filons métallifères par voie hydrothermale, on peut en conclure désormais que la position de tels filons dans une zone où les systèmes de dislocations ont un âge connu peut nous permettre de préciser l'âge de leur incrustation, sans avoir à nous demander s'il s'est écoulé de longues périodes géologiques entre la production de la fracture et son remplissage. Réciproquement, l'âge de la formation filonienne, s'il a pu être déterminé, apporte un enseignement sur l'âge des mouvements correspondants de la région considérée, puisqu'il y a toujours eu presque coïncidence.

On peut même aller plus loin et chercher quelle est actuellement la situation précise des sources thermales par rapport aux derniers plissements dont leurs fractures ont été la conséquence et en déduire, pour chaque période de plissement ancienne, la position corrélatrice

des zones favorables aux apparitions de sources thermales, donc aux remplissages de filons métallifères, comme la tectonique détermine, d'autre part, les zones qui ont pu être, à une époque quelconque, propres aux manifestations volcaniques.

On constate ainsi que, tandis que les plissements mêmes et leurs fractures de chevauchement sont peu propices aux sources thermales, celles-ci se rencontrent volontiers sur les décrochements perpendiculaires aux plis, sur les failles périphériques ou radiales en rapport avec un effondrement et enfin (ce qui rentre un peu dans le cas précédent) sur les lignes de craquement produites dans un massif antérieurement consolidé et jouant le rôle de butoir, par le choc d'un pli postérieur, venant s'abattre sur lui comme une vague. C'est, on le remarquera, tout à fait l'équivalent de la loi à laquelle nous sommes arrivés dans la première partie de ce chapitre, sur la localisation des filons métallifères du groupe plombo-zincifère, qui, nous l'avons vu, sont, en grande majorité, d'âge tertiaire et situés sur des parties de massifs plus anciens, redислоquées par le contrecoup des mouvements tertiaires.

On observe encore, par une conséquence des mêmes principes, que les roches éruptives, les volcans et, par suite, les catégories de sources thermales qui, par exception, se rattachent à eux, ou anciennement les filons métallifères ayant emprunté leurs métaux aux fumerolles dégagées des roches, se trouvent de préférence sur le flanc abrupt des rides terrestres, du côté où se sont réalisés les effondrements.

Au contraire, d'autres sources thermales, produites, suivant la règle normale, par un circuit souterrain pro-

fond, mais indépendantes de toute venue éruptive et, dès lors, plus faiblement minéralisées, sont, avec une abondance presque égale, sur le bord adouci.

Si, maintenant, nous cherchons l'application de notre loi au continent européen, nous sommes amenés à prévoir que, dans les zones septentrionales influencées en dernier lieu par les plissements huroniens et calédoniens, il n'existe pas de sources chaudes, tandis que celles-ci se présentent, soit dans l'avant-pays hercynien de la chaîne tertiaire, soit au nord des Alpes sur les décrochements perpendiculaires aux plis, soit enfin au sud des Alpes, sur le pourtour des effondrements, souvent marqués, d'autre part, par des manifestations volcaniques.

C'est ce qu'il est aisé de voir en parcourant tour à tour les principales régions hydrothermales européennes.

Au nord d'abord, la masse ancienne de notre continent, caractérisée par l'horizontalité du carbonifère et du dévonien, c'est-à-dire par la résistance apportée à tous les plissements depuis la fin du silurien — région comprenant le nord des Iles Britanniques environ jusqu'au canal de Bristol, la Scandinavie et le Plateau Russe — n'offre aucune source thermale digne de ce nom.

En France même, si nous abordons la chaîne hercynienne par son versant nord, le plus éloigné des mouvements alpins et celui sur lequel le contrecoup de ces mouvements s'est fait le moins sentir, nous sommes frappés par la pauvreté hydrothermale de la Bretagne. Une seule source thermale intéressante, celle de Bagnoles, se trouve tout à fait à la limite du massif armoricain

et dans une zone où commence à se manifester l'effet des dislocations tertiaires.

Au contraire, toute la longueur de la chaîne hercynienne proprement dite, dans sa partie influencée par les décrochements et les effondrements d'origine alpine, est remarquablement riche en sources thermales : qu'il s'agisse de la Meseta Espagnole, du Plateau Central Français, des Vosges, de la Forêt-Noire ou de la Bohême. Chacun sait combien sont abondantes, dans ces diverses régions, les eaux chaudes, tantôt simplement thermales sans minéralisation abondante, tantôt riches en acide carbonique et en carbonates divers. L'abondance spéciale des sources carbonatées dans cette zone est évidemment en rapport avec les phénomènes volcaniques qui ont laissé les terrains imprégnés d'acide carbonique, en sorte que, lorsqu'une eau déjà thermalisée les traverse, elle se charge de cet acide sous pression et provoque des dissolutions diverses à l'état de bicarbonates.

Ce genre de sources carbonatées disparaît lorsqu'on aborde, plus au sud, la chaîne plissée d'âge tertiaire dans laquelle, on le sait, les manifestations volcaniques font défaut. On trouve alors tantôt des eaux thermales uniquement remarquables par leur chaleur (sources alpestres ou indifférentes); tantôt, comme sur le versant français des Pyrénées, des eaux chaudes ayant dissous de faibles traces de sulfate de soude, superficiellement réduit en sulfure de sodium; ou encore des eaux contenant un peu de silice en dissolution; ou enfin des eaux ramenant à la surface quelques principes radioactifs ou de l'hélium. L'existence de nombreuses sources salines, minéralisées par le chlorure de sodium, le sul-

fate de calcium (ou, par réduction de celui-ci, le sulfure de calcium), est la conséquence très simple des contacts qui se produisent entre les eaux souterraines, échauffées ou non et d'assez nombreux dépôts lagunaires rattachés au trias des Alpes ou des Pyrénées.

Enfin, si, continuant toujours vers le sud, nous traversons l'axe de la chaîne, généralement assez pauvre en sources thermales, et si nous arrivons dans son arrière-pays méditerranéen, nous rencontrons une zone d'activité volcanique, où abondent, en même temps, les eaux thermalisées. Sans même invoquer un rapport possible entre ces montées d'eau chaude et les grands dégagements de vapeur d'eau que comporte le volcanisme lui-même, il est aisé de comprendre comment, dans des régions où le sol est très échauffé par le volcanisme, où le degré géothermique est très faible, les accidents mécaniques ramenant au jour des eaux thermales doivent être particulièrement abondants, puisqu'il leur suffit d'atteindre à 2 ou 300 mètres de profondeur, au lieu de descendre à un kilomètre. En même temps, le sol se trouve être tout particulièrement fracturé; et, enfin, les fumerolles volcaniques abondantes, notamment les mofettes d'acide carbonique, sont aptes à minéraliser ces eaux. Toutes ces raisons expliquent aisément comment, dans la zone méditerranéenne, on rencontre une abondance spéciale de sources thermales présentant toutes les formes de minéralisation et renfermant, en particulier, des principes rares tels que le bore, l'arsenic ou même, exceptionnellement, le mercure.

Certaines de ces eaux arrivent à produire des phénomènes d'une intensité exceptionnelle, tels que de véritables geysers, des soffioni ou des cascades pétrifiantes.

Le résumé rapide que je viens de donner montre incidemment comment il existe, pour les sources thermales, un type régional analogue à celui que nous avons précédemment étudié pour les gîtes métallifères. La raison en apparaît très simple si l'on ne croit pas devoir faire venir ces eaux thermales du centre de la terre. Elle tient uniquement à ce que, dans une région déterminée, les mêmes conditions tectoniques de fracture, les mêmes éléments chimiques répartis dans les terrains, les mêmes dépôts salins rencontrés par les eaux souterraines, les mêmes mofettes d'acide carbonique, etc., aboutissent finalement à donner des eaux d'une thermalité et d'une composition chimique analogues, ayant par conséquent des chances pour produire à peu près les mêmes effets thérapeutiques.

CHAPITRE VI

Les méthodes nouvelles pour rechercher la houille, le pétrole et les minerais métallifères.

On se fait généralement une idée très inexacte et très vague sur la manière dont on peut arriver à découvrir des matières minérales utiles dans les profondeurs du sol. Le plus souvent, avec la confiance un peu aveugle que notre époque professe, sans distinctions suffisantes, pour les décisions de la science, on s' imagine le géologue doué d'une seconde vue qui, s'il connaît son métier, doit le diriger infailliblement comme une baguette magique et l'on n'hésite pas à accuser son ignorance dans les cas trop nombreux où cette baguette magique ne fonctionne pas avec succès. En même temps, on est volontiers pénétré de cette idée que le sol de la France abonde en richesses minérales insoupçonnées. Un certain chauvinisme, associé avec l'habitude très française de critiquer le gouvernement, conduisent à imaginer que, si ces richesses n'ont pas été mieux utilisées jusqu'ici, c'est la faute des derniers ministères : une faute à laquelle un changement de régime politique doit certainement porter remède.

La vérité est que les découvertes souterraines ne se font pas si facilement ni si sûrement, qu'elles sont rares et problématiques, surtout dans un pays qui, malgré toute notre disposition à nous critiquer nous-mêmes,

a été déjà exploré avec autant de soin et d'ingéniosité que celui de la France. Il reste incontestablement des richesses à découvrir en France et, plus encore, dans notre domaine africain ou dans nos colonies; mais toute exploration de ce genre exige beaucoup de hardiesse, encore plus de persévérance, avec des capitaux assez importants pour que plusieurs échecs successifs n'empêchent pas de poursuivre l'effort jusqu'au succès final, par lequel on doit être récompensé en une fois de toutes ses peines antérieures.

Je vais essayer de montrer, dans trois cas principaux, ceux de la houille, du pétrole et des minerais métallifères, par quelles considérations théoriques on peut être dirigé, comment aussi et dans quelle mesure les derniers progrès scientifiques amènent à localiser le champ de recherches, qu'il reste ensuite à explorer directement et coûteusement au moyen de sondages.

I. RECHERCHE DE LA HOUILLE

Ce problème est à l'ordre du jour. La pauvreté en houille de la France est aujourd'hui généralement connue, et l'on peut seulement s'étonner qu'un fait aussi simple paraisse avoir constitué récemment une révélation tout à fait imprévue, même dans des milieux officiels que l'on aurait pu supposer mieux instruits. On n'en est pas encore à comprendre, dans ces mêmes milieux, que la productivité d'une mine ne s'accroît pas à volonté, comme celle d'une filature où l'on multiplie le nombre des métiers, et qu'en diminuant le rendement de chaque ouvrier par la limitation de ses

heures de travail, on diminue du même coup la production française. Mais, du moins, si l'on n'a pas aperçu cette cause du mal qui afflige toute notre industrie, on sait que ce mal existe et l'on essaye d'y porter remède, soit en remplaçant la houille noire par de la houille blanche ou par des résidus de pétrole, soit même en cherchant à étendre, par des découvertes géologiques, le nombre de nos champs houillers. Ce premier paragraphe aura pour but d'expliquer comment on peut judicieusement chercher et espérer rencontrer de la houille en France. Je limite l'objet de notre étude à la France, parce que, dans d'autres pays plus favorisés, le mode de recherche peut se trouver singulièrement facilité en étant réglé par des lois de continuité toutes différentes, et je considérerai surtout en France la périphérie du Massif Central, où les chances de succès me paraissent être les plus grandes.

La recherche de la houille comprend deux points tout à fait distincts : la rencontre du terrain houiller, ou carbonifère productif, qui, en France, renferme à peu près seul des combustibles minéraux de quelque valeur et, en second lieu, dans ce terrain houiller, la découverte de la houille. Le premier problème est beaucoup plus d'ordre scientifique que le second, où intervient une part considérable de hasard. Nous avons, comme je vais l'expliquer, des raisons très sérieuses pour supposer que le terrain houiller peut exister ici ou là sous un manteau de recouvrement plus ou moins épais. Il nous est beaucoup plus difficile, sinon impossible, dans un bassin houiller inconnu, sur lequel ne nous éclaire aucune expérience antérieure, de dire si nous rencontrerons ou non de la houille. Les rares arguments que

nous pouvons invoquer sont alors beaucoup plutôt négatifs que positifs : nous pouvons avoir des raisons pour douter que la houille exploitable existe dans un certain terrain houiller; nous sommes à peu près sans armes pour affirmer qu'un terrain inexploré sera riche en houille. Je vais examiner de préférence la poursuite du terrain houiller, laissant un peu de côté la question, pourtant capitale dans la pratique, de savoir si ce houiller renferme des couches de houille utilisables.

Ceci dit, nous allons avoir à chercher les lois qui président à la répartition souterraine du terrain houiller afin de pouvoir enlever par la pensée le manteau stérile qui le recouvre pour deviner d'avance ce qui peut exister au dessous.

Au sujet de ces recouvrements, on eût, il y a quelques années, posé sans doute en principe qu'il fallait uniquement chercher du houiller là où des terrains postérieurs au houiller se montrent à la superficie, et jamais lorsqu'on rencontre au jour des terrains antérieurs. C'est la loi ordinaire et classique de la stratigraphie, d'après laquelle les sédiments appartenant à diverses périodes géologiques successives se montrent empilés dans l'ordre de leur âge. Mais il existe, nous le savons aujourd'hui, des exceptions, sur lesquelles j'ai insisté dans un chapitre précédent; ce sont les cas de renversements et de charriages qui introduisent, dans nos recherches du terrain houiller, des conceptions toutes nouvelles. De tels renversements ne sont pas une simple conception de l'esprit, sans application pratique. Sur toute la bordure sud de notre grand Bassin houiller Franco-Belge, ils forment, au contraire, la règle, et toute une campagne de sondages productifs a pu être entreprise sur cette

bordure sud, en partant de terrains antérieurs au houiller productif, tels que le dévonien, pour aller atteindre plus bas le houiller qui, dans l'ordre de la stratigraphie normale, aurait dû se placer au dessus.

Peut-être, dans le Bassin de la Sarre, sera-t-on conduit à chercher de même un houiller profond resté en place sous le houiller actuellement connu et exploité, que certains géologues estiment apporté par charriage.

Dans le Bassin du Gard, où les phénomènes de charriages tertiaires sont aujourd'hui bien reconnus, les explorations à entreprendre dans l'avenir devront également s'inspirer de ces vues, qui transforment singulièrement les idées autrefois reçues.

Enfin, dans le cœur même du Massif Central, il ne serait pas étonnant que des théories semblables trouvent un jour leur application, bien que, jusqu'ici, on ait montré beaucoup de timidité à chercher dans ce sens. Nous savons maintenant que des charriages ont affecté le Plateau Central à l'époque carbonifère et peut-être même que d'autres charriages tertiaires, dont nous venons de rappeler l'effet sur sa bordure sud-est, ont étendu leur action vers le centre. Il ne faut donc pas considérer, comme des limites absolues, les bornes superficielles du terrain houiller, tel qu'il est représenté sur nos cartes géologiques, même lorsque les terrains encaissants sont des gneiss et des granites.

Cependant, des sondages entrepris dans cet esprit ne feraient, en admettant même leur succès douteux, qu'élargir bien faiblement les zones de houiller déjà connues; et il serait beaucoup plus intéressant de découvrir, sous les bassins secondaires et tertiaires qui enveloppent le Plateau Central et le séparent du

Bassin Franco-Belge ou des Vosges, des Alpes ou de la Bretagne, des bassins houillers totalement inconnus jusqu'ici (1).

Nous avons donc à déterminer des emplacements favorables sur ces vastes surfaces où nos cartes géologiques montrent du jurassique, du crétacé ou du tertiaire : emplacements, où l'on entreprendra des sondages destinés à recouper en profondeur le terrain houiller. Le problème que nous nous posons est, comme nous l'avons annoncé, de savoir quelle peut être l'allure profonde du houiller sous ces manteaux de terrains plus récents.

Arrivés là, nous sommes amenés à reconstituer dans notre pensée l'histoire géologique du Massif Central et, spécialement, celle de son terrain houiller, pour nous diriger, d'après les effets présumés de cette histoire, dans la poursuite de ce que nous appelons les « sillons houillers ».

De tels sillons houillers peuvent exister à nu : ce sont ceux, qu'en général, on a exploités jusqu'ici; ou bien ils peuvent être recouverts par un manteau secondaire et tertiaire : ce sont ceux sur lesquels, désormais, nous sommes réduits à fonder nos espoirs d'avenir. Les sillons houillers cherchés existent alors sous un recouvrement de terrains superposés, qui peut avoir, suivant les cas, plusieurs centaines ou même deux ou trois milliers de mètres d'épaisseur et l'allure de ce manteau diffère totalement de celle de son soubassement. Dans l'ordre historique, on doit admettre qu'il s'est produit successivement les étapes suivantes : d'abord, forma-

(1) Voir, à ce sujet, notre mémoire récent : *L'allure probable du terrain houiller entre le Plateau Central et les Vosges*. (Bulletin du Service de la carte géologique, n° 138, 1919.)

tion de lacs restreints, dans lesquels, à l'époque dite stéphanienne (carbonifère supérieur), se sont entassés les végétaux destinés à se transformer en houille; puis mouvement de plissement ayant, entre le carbonifère et le permien, affecté ces dépôts, de manière à les resserrer davantage et à les morceler. Après quoi, comme conséquence de ce mouvement même, il s'est formé des dépressions permienues qui, par un fait très important et indispensable à retenir pour nos recherches, ont généralement suivi les dépressions houillères antérieures en débordant sur elles dans tous les sens, en les élargissant. Là se sont accumulés, pendant le permien, des sédiments qui, au début, présentaient, encore une grande analogie avec les terrains houillers et qui renfermaient souvent des couches de houille avec des schistes bitumineux; puis sont venues de grandes épaisseurs de grès, à teintes fréquemment rougeâtres. Et, enfin, quand le trias a commencé, il a inauguré le régime des étages secondaires : régime qui a amené les dépôts marins à s'étendre par dessus des zones entières de terrains primaires, telles que le Bassin de Paris, celui du Rhône, ou celui de l'Aquitaine sous la forme de strates à peu près horizontales et sans rapport d'allure avec les terrains précédents.

C'est cette série géologique qu'il nous faut traverser en sens inverse, du haut vers le bas, pour retrouver à sa base le terrain houiller.

Nous partons donc, en principe, d'une région où affleurent des terrains secondaires ou tertiaires totalement distincts et indépendants du houiller qu'il s'agit de rencontrer au dessous d'eux. Nous aurons, pour nous diriger, trois natures d'indices : d'abord, une loi

de continuité profonde et de parallélisme des sillons houillers, entendue dans le sens où nous allons l'expliquer; puis, lorsque nous nous sommes trouvés rencontrer le permien ou lorsque nous avons des raisons pour supposer son existence, la connexion, indiquée plus haut, entre le permien du Massif Central ou de ses abords et le houiller (le premier indiquant en quelque sorte une zone d'extension maxima du second); en troisième lieu, une certaine relation de concordance, qu'il ne faut pas exagérer, entre les plissements légers auxquels le manteau de recouvrement a pu être soumis à l'époque tertiaire et les plissements très antérieurs dont le houiller porte l'empreinte profonde. Grâce à ces divers indices que nous allons analyser, nous sommes conduits à esquisser, sur notre carte géologique, des tracés hypothétiques de sillons houillers cachés et il n'est plus alors d'autre moyen pour en vérifier, en préciser et en localiser l'existence que d'entreprendre une campagne de sondages méthodiques, destinés à restreindre progressivement le champ de l'inconnu.

Suivant la région que nous désirons explorer, l'un ou l'autre des trois indices précédents nous instruira davantage. Si, par exemple, nous cherchons au voisinage immédiat d'un affleurement houiller connu, comme on a pu le faire sur les prolongements des bassins de Saint-Étienne, de Blanzay, de Souvigny, etc., la loi de continuité sera notre meilleur guide. Si, aux abords de ce houiller, le permien affleure, nous utiliserons sa présence pour chercher le houiller caché au dessous de lui. Enfin, si nous prétendons attaquer des régions du bassin secondaire, éloignées de tout affleurement houiller ou permien, la loi de continuité devenant de plus en

plus incertaine ou problématique, nous aurons recours à tous les autres enseignements que ce manteau secondaire lui-même peut nous offrir, par ses plissements légers, par ses cassures, par les réapparitions de terrains plus anciens en certains points de son étendue. Comme ce dernier procédé constituera, dans les cas les plus difficiles, notre point de départ, il est bon d'insister, avant tout, sur ces rapports possibles du recouvrement avec son substratum.

La première notion que nous devons avoir bien présente à l'esprit dans sa généralité, sauf à y chercher tout à l'heure des restrictions utiles, c'est que le secondaire repose sur le primaire et sur le houiller, indépendamment d'eux, comme un véritable manteau jeté sur des terrains plissés. Par conséquent, pour trouver le houiller, ou toute autre matière minérale utile intercalée dans le primaire, telle que le minerai de fer sikurien, la méthode de recherche sera complètement différente de celle à laquelle il faudrait recourir si nous voulions découvrir quelque matière minérale utile englobée, j'imagine, dans l'infra-jurassique. Dans ce dernier cas, quand il s'est agi, par exemple, de chercher ainsi les terrains du lias contenant le prolongement du bassin ferrugineux lorrain, il a suffi de se rappeler que celui-ci devait exister à la base d'une série sédimentaire connue et concordante. Indépendamment de l'idée de continuité qui a dirigé les recherches de proche en proche, on a donc alors été déterminé surtout par des considérations presque matérielles, telles que le désir de forer des sondages aussi peu profonds que possible. On est parti, en conséquence, d'une zone présentant à la surface les terrains immédiatement superposés à cet

infra-jurassique et, dans cette zone, on a cherché des points bas de la topographie, afin d'économiser les mètres de terrain supplémentaires résultant du relief superficiel.

Mais il en est tout autrement s'il s'agit d'explorer le soubassement primaire, englobant le houiller, sur lequel, comme je viens de-le rappeler, le recouvrement secondaire, seul apparent à la surface, repose « en discordance ». Les terrains secondaires sont ainsi à peu près horizontaux sur la tranche des terrains plus anciens qui nous intéressent; et ces derniers varient, d'un point à l'autre, tout à fait indépendamment des sédiments superposés. Dans ces conditions, les terrains superficiels ne sembleraient devoir rien pouvoir nous apprendre sur les terrains profonds et nous serions à peu près désarmés si nous ne pouvions utiliser, dans une certaine mesure, une loi de concordance approximative, par laquelle les légers plissements des terrains supérieurs, plissements qualifiés de posthumes, sont reliés aux plis mieux accentués du primaire sous-jacent : de manière que les plis visibles à la superficie nous fournissent des jalons pour deviner l'allure des plis cachés.

On aurait tort, je crois, de généraliser et de vouloir trop préciser cette superposition : ce qui conduit à admettre implicitement que les plissements terrestres ont été dessinés dès la première heure et exécutés ensuite sur un même plan constamment suivi. Mais, quand il s'agit d'un bassin comme celui de Paris, où les derniers plissements ont été très faibles, nous pouvons admettre qu'ils ont pu être, jusqu'à un certain point, influencés par les traces de mouvements antérieurs subsistantes au dessous d'eux.

Des jalons de ce genre nous sont donc utiles pour compléter les premières indications fournies par l'examen des zones houillères sur leurs affleurements visibles.

Voyons, maintenant, comment se présente ce houiller dans le Massif Central qui est, avec le Bassin Franco-Belge, la principale région de la France comportant des richesses houillères. Ce terrain charbonneux, que le mode de représentation habituel sur nos cartes contribue à y mettre en évidence, forme, au milieu des roches granitiques ou gneissiques, généralement teintées en rouge sur les cartes, une série de bandes noires beaucoup plus étroites que larges : bandes dont tout un groupe, à l'est du massif, accuse un parallélisme marqué et dont d'autres, comme celles que l'on appelle le Grand Sillon Houiller de Saint-Éloy, se prolongent sur plusieurs centaines de kilomètres. Cet allongement très net, cette continuité, ce parallélisme qui doivent évidemment se poursuivre dans les parties où le primaire est caché comme dans celles où il affleure, constituent un enseignement important, grâce auquel nous pouvons diriger nos sondages, en commençant par opérer de proche en proche à partir des affleurements. C'est d'après des lois de continuité semblables que l'on a trouvé récemment le houiller de Lorraine ou celui de la plaine de Lyon.

Mais il serait un peu enfantin d'étendre cette loi de continuité à grande distance et de se borner, comme on l'a fait parfois, à relier par une ligne droite deux affleurements houillers, l'un dans le Massif Central, l'autre dans les Vosges, pour vouloir en conclure que le houiller existe dans l'intervalle. Une telle étude est beaucoup plus délicate que cette manière d'opérer trop élémentaire ne le ferait supposer et elle doit faire inter-

venir, outre l'enseignement des plissements tertiaires que je viens de signaler, une théorie rationnelle sur la manière dont se sont constitués et localisés, dès le moment de leur dépôt, nos terrains houillers de la France Centrale. C'est là un point important que je vais aborder maintenant, en réagissant contre les théories qui ont été très généralement adoptées autrefois et que continue à entretenir la comparaison erronée avec d'autres bassins houillers d'un type tout différent, tels que le Bassin Franco-Belge, ou surtout, le Bassin allemand de la Ruhr et ses prolongements dans le Limbourg hollandais et la Campine Belge.

L'idée contre laquelle je m'élève est symbolisée par le terme de « synclinal », que l'on applique souvent aux sillons houillers du Massif Central. Elle consiste à admettre implicitement que les lambeaux houillers actuels sont les restes d'un très vaste dépôt qui a couvert autrefois à peu près tout le pays, comme peut le faire le crétacé dans le Bassin Parisien, mais que ce terrain a été plissé; après quoi, toutes les parties saillantes des plis ont été enlevées par l'érosion, qui a seulement respecté les zones plus profondes encaissées dans des dépressions synclinales. S'il en était ainsi, on pourrait, dans chaque synclinal, retrouver, avec une coupe très analogue, les mêmes couches disposées en fond de bateau et présentant deux affleurements symétriques sur les deux bords du bassin. Cela simplifierait infiniment les recherches, puisqu'une fois la disposition du houiller reconnue ou présumée, on pourrait se borner à placer un sondage sur le thalweg du synclinal : sondage qui recouperait toute la série des couches houillères en son point le plus bas et qui permettrait, par consé-

quent, suivant la méthode d'exploitation généralement adoptée en pareil cas, d'abattre des deux cotés ses amont-pendages.

L'erreur que l'on commet tient à ce qu'on se représente nos couches houillères du Centre comme offrant la régularité continue qui caractérise les dépôts marins, alors qu'il s'agit de formations fluviatiles ou lacustres, ayant été, dès leur dépôt et indépendamment même de tous les mouvements postérieurs, extrêmement irrégulières. Ce qui pourrait être exact, par exemple, avec quelques restrictions pour les synclinaux siluriens où l'on cherche aujourd'hui le fer de Bretagne et de Normandie, ce qui pourrait être également à peu près vrai pour un bassin houiller ayant subi l'influence régulatrice des eaux marines, — cas dont notre bassin houiller du Nord est, en France, le seul représentant, — devient tout à fait erroné lorsqu'il s'agit des terrains houillers du Centre, dont il ne faut jamais oublier le caractère essentiellement lacustre. Les sillons houillers du Massif Central n'ont pas été localisés après coup par l'effet des plissements et leur allongement ne résulte pas de ces plissements; ils sont localisés parce qu'ils se sont déposés dans des lacs très limités et, s'ils offrent un allongement très marqué suivant certaines directions de plissement, c'est parce que ces plissements avaient, antérieurement à leur dépôt, présidé à l'allure topographique des lacs, dans lesquels les végétaux houillers sont venus ensuite s'accumuler.

Cela ne veut pas dire que les affleurements houillers actuels représentent toute la largeur des dépôts houillers anciens et que les plissements postérieurs ne soient pas intervenus. Il est parfaitement certain que tous

nos bassins houillers du Centre ont été fortement plissés après coup. Mais ces plissements postérieurs n'étaient qu'un dernier écho des mouvements précédents, auxquels avaient commencé par être dues les cuvettes lacustres, et l'erreur habituelle vient seulement de ce que les plissements postérieurs sont restés, dans leur sens général, conformes aux plissements antérieurs, dont ils ont accentué et exagéré l'effet.

Nous sommes, en résumé, conduits à explorer, non des synclinaux houillers, débris d'une vaste formation morcelée, mais des cuvettes lacustres d'origine quelconque, ayant toujours été très restreintes et localisées, aussi bien dans leur extension totale que dans les conditions particulières de leurs dépôts charbonneux, gréseux ou schisteux (1).

Représentons-nous la France au début de cette période stéphanienne, qui a vu se produire nos dépôts houillers du Centre. A cette époque, une grande chaîne orographique devait relier l'Armorique, le Massif Central et les Vosges, avec un relief particulièrement accentué dans le sud et des pentes adoucies vers le nord, où ces pentes devaient aboutir à des lagunes saumâtres communiquant avec la mer. Cette chaîne avait été, aux époques précédentes, dinantienne et westphalienne, témoin de manifestations volcaniques qui tendaient alors à s'atténuer, après avoir peut-être, par les quantités d'acide carbonique déversées dans l'air, contribué à un développement exceptionnel de la végétation. Il est probable qu'à un moment, elle avait dû offrir, en

(1) Vers le nord-est, dans la Sarre, comme vers le sud-est, dans le Gard, on retrouve une sédimentation plus régulière à influences marines.

outre, comme nos Alpes actuelles, des saillies accidentées formées de terrains non métamorphiques, plissés, redressés et charriés; mais nous sommes portés à croire qu'avant le début des dépôts houillers l'érosion avait déjà eu le temps d'effacer ces saillies de calcaires et schistes plissés pour ne laisser guère voir que les terrains métamorphiques et les roches cristallines de leur profondeur. Quand on examine les terrains et les roches formant les bords de ces cuvettes houillères, ou quand on scrute les galets qui y ont formé des conglomérats après avoir été empruntés à ces bords, on est, en effet, frappé de voir que la région devait être, dès lors, constituée presque exclusivement de granites, gneiss et schistes cristallins, tels que ceux qui forment encore la presque totalité du Massif Central, (abstraction faite des roches et sédiments tertiaires).

On est ainsi amené à établir une différence absolue entre les lacs de l'époque houillère et ceux que nous pouvons rencontrer aujourd'hui dans une chaîne alpestre, en Suisse ou en Haute-Italie. Nous nous représentons plutôt, à l'époque houillère, des traînées de dépressions marécageuses relativement peu profondes, sur des plateaux morcelés et dénivelés par échelons successifs.

Ce qui a dû contribuer puissamment à l'allure des lacs en question, c'est que, sur chacun d'eux, le mouvement initial, par lequel il avait été d'abord esquissé, paraît s'être continué et accentué pendant et après le dépôt, déterminant une accumulation progressive des sédiments sur la même zone pour les plisser ensuite. Il y a eu là quelque chose d'un peu analogue à ce qui s'est passé sur tout le territoire de Gondwana, en Afrique Australe, dans l'Inde, etc., pendant ces longues périodes où s'y

sont accumulés en concordance des terrains, demeurés encore aujourd'hui horizontaux et contenant souvent de la houille, mais avec cette différence importante que les dépôts du Gondwana, (Karoo sud-austral, etc.), semblent s'être déposés sur un fond de bassin affaissé en bloc sans plissement, tandis que, dans notre cas présent, la compression a agi bientôt, avant le permien, pour déterminer l'allure plissée des couches actuelles.

Les remarques que je fais ici sont de nature à nous éclairer sur l'allure des lacs houillers que nous devons commencer par retrouver pour y chercher ensuite la houille; mais elles ont aussi leur valeur quand il s'agit d'aborder la seconde question qui se pose dans toute exploration de ce genre, la recherche de la houille elle-même.

Là encore, on doit se tenir en garde contre les hypothèses erronées, auxquelles peut conduire la connaissance des bassins réguliers à sédimentation marine. Ne supposons pas, dans le Massif Central et à ses abords, des couches de houille continues, dont le morcellement serait uniquement dû à des accidents mécaniques postérieurs. La houille de ces bassins lacustres s'est formée localement, par paquets, sur le talus de quelque delta, au débouché de quelque fleuve, et nous ne pouvons espérer établir, à plusieurs kilomètres de distance, une concordance entre des couches dont les conditions de dépôt ont été entièrement gouvernées par des influences restreintes; nous ne pouvons non plus compter sur la persistance d'une telle couche transversalement au bassin, d'abord jusqu'au fond de la cuvette, puis sur le versant opposé. L'expérience montre, au contraire, que les amas de houille, à disposition lenticulaire, y sont

souvent limités à un des bords du sillon houiller, qu'ils ne se continuent pas jusqu'à son thalweg et que, suivant la direction de l'affleurement, ils présentent de nombreux étirements succédant à des renflements, des bifurcations et des disparitions complètes. Ces considérations ne sont pas de nature à faciliter les recherches, auxquelles elles retirent leur principal point d'appui théorique; mais elles contribuent à inspirer de la persévérance dans bien des cas où l'on s'est contenté d'un essai négatif au centre du bassin suivant l'ancienne mode pour en conclure l'absence générale de houille.

II. LA RECHERCHE DU PÉTROLE.

La recherche du pétrole est, comme celle de toute autre substance minérale, influencée par l'idée que l'on a commencé par se faire sur son origine. J'adopterai, à cet égard, la théorie de l'origine organique qui est désormais, à bien peu d'exceptions près, admise par tous les géologues, en laissant de côté l'origine interne, surtout défendue par des chimistes : non pas que cette théorie organique réponde dès à présent à toutes les objections et résolve tous les problèmes posés, mais parce que, dans la très grande majorité des cas, elle permet d'expliquer les faits d'observation, sans avoir recours, comme la théorie volcanique, à des réactions internes, mystérieuses et insaisissables. La théorie volcanique garderait sans doute bien peu de partisans si le pétrole ne nous apparaissait pas, dans de nombreux gisements, sous une forme jaillissante qui tient uniquement à la pression des gaz accumulés dans les

réservoirs souterrains, mais qui prête à son mode de venue une apparence tumultueuse susceptible de rappeler un phénomène éruptif. En réalité, les dépôts originels de pétrole doivent être tout à fait analogues aux couches de houille ou de schistes bitumeux et ce qui se produit pour le jaillissement du pétrole n'est pas très différent de ce qui arrive quand de la houille est projetée par une explosion de grisou.

Nous considérons donc que, dans certaines conditions favorables généralement dues à l'accumulation des matières organiques au débouché d'une lagune saumâtre, il s'est constitué des dépôts-mères de pétrole, souvent associés, par suite de leur origine même, avec des argiles et avec des eaux salées. Ces terrains, qui ne décèlent pas toujours la présence du pétrole liquide, semblent être souvent des schistes assez imprégnés d'hydrocarbures pour brûler avec une flamme épaisse. On comprend que leur dépôt n'ait pas dû représenter un épisode unique de la sédimentation, mais se soit renouvelé en produisant plusieurs couches pétrolifères superposées, absolument comme nous rencontrons plusieurs couches de houille séparées par des intervalles de grès et de schistes. Mais une différence capitale entre ces dépôts de pétrole et les dépôts de houille, auxquels nous les comparons, c'est que la houille est restée totalement à sa place primitive depuis l'instant de sa formation, à peine modifiée par un départ de ses manières volatiles, tandis que le pétrole a subi des remises en mouvement constantes, prolongées encore sous nos yeux. Il en résulte que, dans le cas du pétrole, le dépôt originel, le dépôt-mère n'est qu'un des éléments industriels utilisables, élément souvent

appauvri par le départ même qu'il a subi et que nous observons, au dessus, dans les terrains superposés, une série d'autres dépôts adventifs jouant le rôle de réservoirs souterrains, dans lesquels le pétrole s'est emmagasiné en proportion de leur porosité ou de leurs fissures. On peut rencontrer ainsi, en coupe verticale, un grand nombre de grès pétrolifères, ou, plus rarement, de calcaires pétrolifères, dans lesquels la présence du pétrole est due à un phénomène physique et mécanique, non aux conditions primitives de la sédimentation.

Ce déplacement du pétrole dans le sens de la verticale est favorisé par l'extrême mobilité et la puissance de pénétration de cette substance, qui réussit à traverser, par des interstices presque invisibles, des couches à l'aspect tout à fait opaque.

Le pétrole remonte ainsi de niveau poreux en niveau poreux, souvent jusqu'à ce qu'il atteigne la superficie et signale à nos yeux sa présence profonde. On comprend aisément que les points où le pétrole vient ainsi se manifester au dehors sont, toutes choses égales d'ailleurs, ceux où il doit rester le moins de pétrole profond : précisément parce que, depuis un temps très long, ce pétrole est venu se perdre à la surface. Néanmoins, c'est, en général, sur de semblables points que l'attention a été attirée et que les exploitations de pétrole ont commencé dans la plupart des régions exploitées. Il y a peu de temps encore que l'on s'est enhardi assez pour aller chercher du pétrole en profondeur là où il n'affleurerait pas au jour et les premiers succès de ce genre ont été, il faut bien le dire, tout à fait accidentels : par exemple aux États-Unis, où l'on a souvent rencontré le pétrole en cherchant le sel et,

tout récemment, dans la République Argentine, où l'on a eu l'heureuse surprise de découvrir un champ pétrolifère ignoré dans un puits qui visait seulement à procurer de l'eau. Mais aujourd'hui on sait très bien, au Kansas ou au Texas, traverser des morts-terrains créacés pour aller exploiter du pétrole au dessous, exactement comme on le fait pour trouver la houille dans le Nord ou dans le Pas-de-Calais.

Pendant un tel mouvement ascensionnel, le pétrole subit nécessairement une altération croissante due à ses contacts plus directs avec l'air. Il perd, en même temps, ses principes volatils. De sorte que les affleurements pétrolifères commencent souvent par offrir seulement des hydrocarbures solides ou visqueux, des bitumes, des ozocérites, des asphaltes; après quoi, en s'approfondissant, on recoupe des niveaux à pétroles de plus en plus purs et de plus en plus riches en huile lampante.

En résumé, l'on voit que les conditions nécessaires à la présence du pétrole exploitable sont : avant tout, la formation ancienne du ou des dépôts originels profonds; puis les facilités que les terrains superposés ont présentées pour la mise en réserve de la substance mobile, conditions qui se ramènent à deux points principaux, existence de niveaux poreux continus et homogènes tels que des sables et grès et présence de fissures facilitant les communications de ces strates superposées les unes avec les autres.

Quand on se trouve ainsi dans une région pétrolifère, on est amené à approfondir de plus en plus les sondages : ce qui a généralement pour résultat de produire en abondance plus grande du pétrole de meil-

leure qualité; mais il y a, naturellement, une limite à cet approfondissement, c'est le moment où l'on recoupe le plus profond des dépôts originels. J'ai pu, à ce propos, émettre autrefois l'idée que le pétrole pourrait être emprunté dans certains cas à une distillation souterraine opérée sur des schistes bitumineux en vertu de la chaleur interne (1) et certaines découvertes récentes ont, comme je l'ai dit plus haut, paru apporter un commencement de confirmation à une semblable hypothèse.

La recherche des strates pétrolifères originelles se trouve un peu compliquée par la rapidité avec laquelle ces couches laissent suinter au dehors et perdent la plus grande partie de leur pétrole dès qu'elles sont mises à jour. C'est souvent le long des chaînes montagneuses qu'on les a observées. Cette localisation est très loin de présenter, comme on l'a cru parfois, un caractère absolu, puisque certaines régions riches en pétrole comme le Bassin des Appalaches, le Kansas, le Texas et la Louisiane ne présentent aucun caractère montagneux et ne contiennent pas de terrains plissés. Là où la connexion existe, elle correspond d'abord aux conditions mêmes dans lesquelles nous admettons que s'est formé le pétrole. Chaque mouvement de plissement a dû, en effet, avoir pour conséquence la production, sur la chaîne nouvelle, de grandes lagunes allongées, dans lesquelles se sont accumulés, suivant les moments, tantôt de simples matériaux détritiques amenés là par l'érosion, tantôt des produits de concentration saumâtre, des gypses et

(1) *Gîtes minéraux et métallifères*, I, 492.

sels, associés avec des matières organiques. Il est possible aussi que la continuation des plissements, agissant sur des terrains déjà hydrocarburés, ait amené le retour en profondeur de ceux-ci avec leur distillation profonde, leur déplacement et leur concentration nouvelle. Mais, indépendamment de ces causes premières, il faut également penser que les couches plissées et redressées des chaînes montagneuses offrent de nombreux affleurements visibles, tandis que, dans les profondeurs d'une cuvette sédimentaire, des épaisseurs considérables de terrains peuvent exister sans que nous en ayons le moindre soupçon à la surface.

On a été souvent surpris, quand les circonstances ont amené à forer des sondages à travers de semblables cuvettes sédimentaires récentes, notamment à travers des dépôts tertiaires aux couches marines, par les grandes épaisseurs de terrains que l'on a rencontrés et dont la plupart étaient totalement inconnus au jour. Cela s'est produit en Alsace, dans la Limagne d'Auvergne, dans le Bassin du Rhône, etc. Sur quelques-uns de ces bassins, on voit du pétrole adventif ou des produits bitumineux monter jusqu'à la surface. Mais ces hydrocarbures proviennent de terrains sous-jacents invisibles à la superficie et il est permis de penser que, dans de nombreux cas semblables, l'écorce terrestre renferme encore des ressources en pétrole tout à fait insoupçonnées, destinées seulement à être découvertes quand on aura exploré, jusqu'à leur fond de roches primitives, toute l'épaisseur de tels bassins.

Ce que je viens de dire là pour le pétrole tertiaire doit être également exact pour des cuvettes de sédi-

mentation analogues ayant pu se produire à la suite des autres grands mouvements orogéniques : en particulier, pour l'Europe, à la fin du mouvement hercynien. Les dernières découvertes de pétrole récemment faites en Angleterre semblent l'application d'une idée semblable dans un cas où l'on ne connaissait, aux affleurements, que des schistes bitumineux.

Quand on est ainsi amené à penser qu'une région peut contenir du pétrole, on se trouve à peu près dans la même situation que lorsqu'on connaît l'existence du terrain houiller sans avoir reconnu celle de la houille. A certains égards, le problème est même plus difficile. Il semble, en effet, peut-être par les conditions mêmes du dépôt, beaucoup aussi par suite des remises en mouvement qui ont pu épuiser les couches profondes, que, sur une région pétrolifère très étendue, les points où le pétrole atteint une réelle valeur industrielle soient, eux, très localisés. Cela est manifeste sur la longueur des Carpathes, où l'on connaît du pétrole un peu de tous les côtés, mais où, en résumé, les succès industriels ont été restreints à deux ou trois points de la Galicie, et un ou deux de la Roumanie. On ne voit pas, jusqu'ici, de règle théorique qui puisse permettre de prévoir des centres d'enrichissement. Mais, dans un de ces centres à son tour, la richesse en pétrole paraît varier beaucoup avec la disposition des plissements. La théorie, dite anticlinale, très généralement adoptée par les pétroliers, consiste à placer de préférence les sondages sur les plissements anticlinaux. Elle s'explique d'ailleurs aisément tant qu'il s'agit de pétrole adventif et remis en mouvement; ce pétrole, poussé par la pression des gaz qu'il renferme, doit, à l'inté-

rieur d'une couche poreuse ou fissurée, être poussé de préférence vers le haut des voûtes et délaisser, au contraire, les parties creuses des plis.

Ajoutons que l'épuisement des niveaux pétrolifères est extrêmement rapide, en raison même de la facilité avec laquelle on exploite cette substance, qu'il suffit d'aller rencontrer en profondeur par un sondage, pour la voir aussitôt s'élever plus ou moins haut dans le trou de sonde et souvent jaillir à la superficie. Mais cet épuisement apparent, qui arrête vite dans l'emploi du procédé d'exploitation par sondage, est, en réalité, très incomplet. Une ingénieuse théorie de M. de Chambrier, dont l'application a pu être faite en Alsace, à Pechelbronn, conduit à penser que le drainage des couches pétrolifères par des sondages, même très multipliés comme ceux auxquels on a généralement recours aujourd'hui, laisse, dans la strate poreuse, les 3 ou 4 cinquièmes du pétrole primitif. Le jour où les prix du pétrole auront suffisamment monté — ce qui arrivera vite si la courbe de consommation pétrolifère continue à s'élever avec la même vitesse vertigineuse, — on aura donc la ressource de reprendre un à un, par travaux de mine profonds, les niveaux réputés épuisés, ainsi que l'on exploite des couches de houille grisouteuses, pour y recueillir le pétrole dans les galeries et, au besoin, l'extraire des grès par un lavage à l'eau bouillante. Il est probable que, de cette manière, on prolongera le temps assez court, pendant lequel l'humanité pourra continuer à utiliser ce précieux combustible.

III. RECHERCHE DES MINERAIS MÉTALLIQUES PAR LE MAGNÉTOMÈTRE ET LE PROCÉDÉ ÉLECTRIQUE.

L'expérience des mines suffirait à prouver que, dans de nombreux cas, nous passons, sans nous en douter, au voisinage immédiat de masses métalliques renfermant des richesses importantes. Cela est particulièrement vrai pour les minerais qui se présentent en amas sans continuité, limités de tous côtés; un tel amas peut arriver jusqu'à quelques mètres de la surface sans y être visible; ou bien encore, il peut commencer par un pointement presque insignifiant qui s'élargit ensuite dans la profondeur. Il est arrivé ainsi de rencontrer par hasard des masses considérables de pyrite ou de calamine. Dans la poursuite des filons eux-mêmes, on est constamment arrêté en pratique par un accident ou par une serrée qui laissent dans l'incertitude sur la possibilité d'un prolongement utile et sur le sens où il convient de le chercher. Enfin, même pour certains minerais sédimentaires intercalés dans une série redressée de terrains primaires, on se pose souvent des problèmes analogues. Dans toutes les recherches de ce genre, l'idée vient naturellement que des procédés d'investigation scientifique à distance, fondés sur le magnétisme ou sur l'électricité, devraient permettre d'épargner des percements de galeries coûteux en terrain stérile, ou tout au moins aider à en déterminer la direction.

On a déjà passablement travaillé dans ce sens et l'on est arrivé à quelques résultats que je vais résumer tout à l'heure en raison de leur nouveauté. Jusqu'ici,

à vrai dire, le problème cherché est très loin d'être résolu; mais il semble que l'on ait, dès maintenant, trouvé une voie à suivre et il est permis de penser que la guerre aura eu, sur ce point, un effet utile, en multipliant les applications de procédés analogues pour la télégraphie et la téléphonie sans fil, le captage des communications ennemies, le repérage par le son, la chasse aux sous-marins, etc.

Je commence par quelques mots sur les procédés magnétiques, qui sont relativement anciens et réellement entrés dans l'application pratique. Ces procédés, fondés sur l'emploi du magnétomètre, n'ont servi, jusqu'ici, qu'à rechercher des amas de magnétite plus ou moins mélangés d'oligiste et ils ont été, en conséquence, particulièrement utilisés en Suède où de tels minerais jouent un grand rôle et sont fréquents. Il faut, en effet, pour que le procédé s'applique, que le minerai soit nettement magnétique. Cependant, on peut espérer le perfectionner assez pour l'adapter un jour à d'autres minerais doués d'un magnétisme plus faible.

Le système est fondé sur l'emploi d'un instrument, au moyen duquel on peut déterminer la déclinaison ou l'inclinaison magnétique en chaque point : magnétomètre de Thalen ou balance d'inclinaison de Tiberg. Le magnétomètre de Thalen est une simple boussole de déclinaison, qui permet, au moyen d'un aimant mobile et de repères placés sur le sol, de mesurer rapidement la composante horizontale de l'intensité magnétique terrestre. On trace ainsi des courbes d'égal potentiel magnétique, qui enveloppent deux foyers correspondant : l'un au maximum, l'autre au minimum de déviation. La droite, réunissant ces foyers,

donne alors l'axe du gisement profond. La balance d'inclinaison permet également de mesurer l'attraction de la masse métallifère magnétique et de déterminer sa position approximative.

Je vais insister beaucoup plus sur les recherches électriques qui sont la partie vraiment neuve de ce sujet, et je le ferai en suivant un mémoire récent de M. Schlumberger, le très ingénieux et savant inventeur de la méthode actuellement la plus pratique (1). Mais, avant de passer à la description de cette méthode, il sera bon d'indiquer les autres idées qui ont été mises en avant dans le même ordre de recherches et de montrer pourquoi elles ont échoué et ont été abandonnées.

Le problème de la prospection électrique semble, au premier examen, se présenter assez simplement et pouvoir être abordé par diverses voies. Il apparaît naturel qu'un amas métallique intercalé dans un sol normalement composé de calcaires, schistes et grès, ou de roches cristallines, doit introduire des inégalités pour tous les phénomènes électriques qui peuvent exister naturellement ou être provoqués artificiellement et que la constatation de ces inégalités doit amener à déterminer sa présence.

Par exemple, si l'on mesure la résistance électrique d'un circuit terrestre compris entre deux points distants de 100 mètres et si l'on déplace cette base parallèlement à elle-même, au moment où vient s'intercaler au milieu d'elle une masse métallique conductrice,

(1) *Étude sur la prospection électrique du sous-sol*. 1 volume, chez Gauthier-Villars 1920. On trouvera dans ce travail, une bibliographie des ouvrages antérieurs.

on doit observer une résistance particulièrement faible. On peut également, sans mesure de résistance, produire un courant rapidement variable entre deux points et observer le passage de ces courants par une ligne mobile contenant un téléphone. En sol hétérogène, les sons observés varient d'un point à l'autre et la traversée d'une masse métallique introduit des sons très différents comme nature et comme amplitude. On peut encore, et c'est, en résumé, la méthode de M. Schlumberger, appliquer entre deux points une différence de potentiel électrique et tracer dans l'intervalle les courbes équipotentiellles, perpendiculairement auxquelles se dirigent les courants. L'intercalation d'une masse à conductibilité métallique introduit une déviation manifeste de ces courbes équipotentiellles, qui sont également influencées par toute hétérogénéité des terrains, notamment par le passage des failles.

Enfin, on a pu songer à provoquer des phénomènes de polarisation à la surface d'amas métalliques en faisant passer dans le sol un courant de sens constant, qui détermine une électrolyse de l'eau contenue dans les terrains situés autour des minerais. En coupant le courant, on aurait dû pouvoir observer les différences de potentiel dues au courant de décharge et localiser l'amas conducteur. A l'expérience, on s'est rendu compte que cette méthode ne donnait aucun résultat, parce que la périphérie d'un amas métallique et, particulièrement, d'un amas pyriteux, présente, à l'état constant, une polarisation spontanée due à l'oxydation constante de cette pyrite : polarisation qui s'accroît lorsqu'elle est ouverte par des travaux de mines, mais qui existe même dans un amas de pyrite encore intact.

On s'est alors borné, comme nous allons le dire, à observer cette polarisation spontanée et à en tirer parti.

La difficulté de tous ces procédés tient à la très faible intensité des phénomènes qu'il s'agit d'utiliser et, par suite, aux perturbations de tous genres qui peuvent produire des effets analogues sans aucune intervention de minerais métalliques. Il en résulte que, jusqu'à nouvel ordre, on ne peut compter sur des résultats que lorsque le minerai est à une faible profondeur, d'une vingtaine de mètres au plus; ce qui n'empêche pas la méthode électrique de pouvoir rendre de très grands services dans toutes les régions où un terrain de recouvrement peu épais, un simple dépôt de limon, de terre végétale ou d'alluvion masque entièrement le sol. Nous ajouterons que l'influence de la masse métallifère reste constante, tandis que toutes les influences perturbatrices sont sujettes à se modifier, soit quand on varie le mode opératoire, soit simplement quand on observe à des moments différents : ce qui permet d'éliminer les causes d'erreur au moyen de recoupements.

Reprenons maintenant les divers procédés, dont je me suis borné, jusqu'ici, à énoncer le principe.

Les mesures de résistance ont été brevetées aux États-Unis par Brown et Mac Clatchey. Leur défaut principal est que, lorsqu'on détermine un courant entre deux points, ce courant ne s'écoule pas, suivant le chemin le plus court, le long de la base, mais pénètre par des filets profonds, à large section, dont la résistance intervient à peine. Il en résulte que la résistance observée se limite pratiquement au voisinage immédiat des

deux bases et que la disposition du sol à l'endroit des prises de terre masque, par son influence, celle des masses métalliques interposées.

La méthode téléphonique, préconisée en 1902 par Daft et Williams, a été momentanément abandonnée. On peut attribuer son échec aux phénomènes d'induction qui ont lieu entre le circuit inducteur et le circuit induit téléphonique.

J'arrive donc à l'étude de la conductibilité électrique par lignes équipotentielles : méthode soigneusement étudiée et mise au point par M^e Schlumberger.

La conductibilité d'un minéral peut dépendre de sa conductibilité propre quand il se comporte à la façon d'un métal, comme cela a lieu pour la pyrite, le mispickel, la galène, les sulfures de cuivre, la magnétite et la pyrolusite (à l'exclusion de la blende et de la stibine); mais elle peut aussi être produite par un phénomène beaucoup plus général tenant à l'eau d'imbibition qui confère aux terrains une conductibilité électrolytique. La résistivité dépend, d'ailleurs, de circonstances minéralogiques ou physiques très variables, telles que l'isolement des cristaux de magnétite enveloppés par de la silice dans le premier cas, ou la distribution capillaire du réseau aqueux dans le second. En moyenne, d'une roche à l'autre, la conductibilité varie dans le rapport de 1 à 10. La proportion atteint 1 à 1000 quand interviennent des minerais conducteurs.

J'ai dit que la méthode consiste à appliquer, entre deux points, une différence de potentiel électrique, de manière à établir entre eux un courant, et à tracer, dans l'intervalle, les courbes d'égal potentiel. Ces courbes sont régulièrement symétriques dans le cas

d'un terrain homogène; mais, s'il s'intercale une masse conductrice, celle-ci semble repousser les surfaces équipotielles qui paraissent, au contraire, attirées par un corps isolant ou par une cavité. Une faille se traduit par une attraction exercée vers celui des deux terrains en contact qui joue le rôle d'isolant relatif et par une brusque inflexion de toutes les courbes le long de la faille.

On peut donc établir rapidement deux prises de terre au moyen de piquets métalliques placés en cercle et les relier par une ligne isolée aux deux pôles d'une génératrice (dynamo ou accumulateur). Ayant ainsi provoqué un courant, on étudie les différences de potentiel au moyen d'une ligne volante, sur laquelle on intercale un galvanomètre. En laissant fixe un des électrodes de la ligne volante et déplaçant l'autre à la surface du sol, on reconnaît qu'on est sur une ligne de même potentiel, quand le galvanomètre n'accuse plus de déviation. L'emploi du courant continu nécessite des électrodes impolarisables formées d'un tube en cuivre rouge serti dans un vase poreux contenant une solution concentrée de sulfate de cuivre.

Parmi les difficultés du système, il faut compter, en premier lieu, les anomalies déterminées par le relief du sol en terrain accidenté, les phénomènes de polarisation spontanée et les courants telluriques. Dans le relief du sol, un vallon est assimilable à un corps isolant, une colline à un excès de matière.

Enfin, j'ai signalé la possibilité d'étudier la polarisation spontanée qui se réalise sur tous les amas pyriteux en raison de leur tendance à l'oxydation. Cette méthode est d'une application très simple et permet de battre

rapidement la superficie en reconnaissant la présence de masses métalliques situées à moins de 10 ou 15 mètres en profondeur. On ne saurait ainsi établir une différence nette entre des schistes pyritisés sans valeur et un amas pyriteux compact de même dimension; mais il n'en résulte pas moins une première connaissance du terrain prompte et peu coûteuse, qui peut ensuite être complétée par des sondages judicieusement placés.

J'ajoute, avant de terminer, que le magnétisme et la conductibilité électrique ne sont pas les seules propriétés des minerais auxquelles on puisse recourir pour reconnaître leur présence profonde. On a également pensé à mesurer la densité du sol au moyen du pendule : cette densité, qui agit par l'attraction newtonienne, étant accrue s'il existe des minerais. Mais ce procédé, dont j'ai déjà eu l'occasion de parler (1), ne serait tout au plus applicable que sur un sol très horizontal, puisque, s'il y a inégalité du relief, les saillies du terrain exercent, elles aussi, une attraction influençant la durée d'oscillation pendulaire. Dans tous les cas, les perturbations, qui pourraient être produites, sont à la limite de précision des mesures. L'élasticité du sol constitue également un phénomène influencé par l'intercalation d'un corps hétérogène susceptible de déceler sa présence. On s'est trouvé faire quelques expériences dans cet ordre d'idées pour l'étude des vibrations sismiques, en observant, sur un bain de mercure, les ondulations du sol transmises à distance après une explosion de dynamite. La méthode est suffisamment

(1) Page 32.

sensible pour que des intercalations de filons rocheux dans un ensemble homogène aient pu être ainsi reconnues. Mais, pour éviter l'influence des vibrations superficielles, on avait déjà été obligé de se placer à grande profondeur dans des travaux de mines : ce qui, en dehors de tous les autres défauts, restreindrait singulièrement l'emploi de la méthode.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.	I
CHAPITRE PREMIER. — LES PROBLÈMES DE LA SÉDIMENTATION. — I. La notion de facies et l'océanographie ancienne. — II. L'évolution sous-marine de nos terrains. Les réactions de la diagénèse. — III. Les altérations superficielles (métasomatose)	1
CHAPITRE II. — LA TECTONIQUE OU OROGÉNIE. — Les plissements de l'écorce terrestre. Renversements. Plis couchés. Nappes. Charriages. Mylonites, etc	31
CHAPITRE III. — L'HISTOIRE DES OCÉANS. LA MÉDITERRANÉE, L'ATLANTIQUE ET LE PACIFIQUE	71
CHAPITRE IV. — LES RELATIONS DE LA GÉOLOGIE AVEC LES AUTRES SCIENCES. — I. La mort de la Terre et du Soleil. Les évaluations géologiques en années. — II. Comparaison avec la Lune. — III. L'intérieur de la Terre	100
CHAPITRE V. — MÉTALLOGÉNIE ET SOURCES THERMALES. — I. Les types régionaux de gîtes métallifères. — II. Les relations des sources thermales avec les mouvements orogéniques les plus récents	142
CHAPITRE VI. — LES MÉTHODES NOUVELLES POUR RECHERCHER LA HOUILLE, LE PÉTROLE ET LES MINÉRAIS MÉTALLIFÈRES.	171

IMPRIMERIE DE MONTLIGEON
LA CHAPELLE-MONTLIGEON (ORNE). — 10412-10-20.

Majoration temporaire : 100 %

- ANGOT (A.)**, Directeur du Bureau central météorologique, Professeur à l'Institut national agronomique. — **Traité élémentaire de Météorologie**. 3^e édition revue et corrigée. In-8^o (25-16) de VII-416 pages avec 105 figures et 4 planches; 1916..... 14 fr.
- ANGOT (A.)**, Directeur du Bureau Central météorologique, professeur à l'Institut national agronomique. — **Instructions météorologiques**. 6^e édition, revue et corrigée. In-8 (25-16), de VI-184 pages, avec 33 figures et 4 planches, suivi de nombreuses Tables pour la réduction des observations; 1918..... 10 fr.
- ANGOT (A.)**, Directeur du Bureau central météorologique, Professeur à l'Institut national agronomique. — **Abrégé des instructions météorologiques**. In-8 avec figures; 1903..... 1 fr. 50.
- CANU (F.)**, Publiciste. — **Précis de météorologie endogène**, avec une Préface de *Philippe Gérigny*. In-18 (19-12), avec figures; 1894. 3 fr. 50
- GUILHON (E.)**, Lieutenant de vaisseau. — **Théories météorologiques et Prévision du temps**. In-8 (25-16), avec 29 figures et tables; 1894..... 2 fr. 50
- HILDEBRANDSSON (H.)**, Directeur de l'Observatoire météorologique d'Upsal, et **TEISSERENC DE BORT (Léon)**, Directeur de l'Observatoire de Météorologie dynamique. — **Les bases de la météorologie dynamique**. 2 vol. in-8 (25-16), avec figures et planches:

TOME I : *Introduction. Recherches sur les tempêtes tropicales; sur les tempêtes des zones tempérées. Théories centrifètes. Les tempêtes tournantes en Europe. Organisation du service météorologique international. Sur la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Distribution moyenne des éléments météorologiques à la surface du globe*; avec nombreuses figures et 82 planches; 1898-1907..... 11 fr.

TOME II : *Distribution des éléments météorologiques autour des minima et des maxima barométriques. Sur la circulation générale de l'atmosphère. Orages et grains. Hauteurs et vitesses des nuages. Sur la circulation de l'air autour des minima et des maxima barométriques et sur la formation des satellites*; avec nombreuses figures et 73 planches; 1900-1905..... 12 fr. 50

On vend séparément :

LIVRAISON I, 2 fr. — II, 4 fr. — III, 5 fr. — IV, 3 fr. — V, 2 fr. 50. — VI, 2 fr. — VII, 3 fr. — VIII, 2 fr.

REVUE GÉNÉRALE DES TRAVAUX ASTRONOMIQUES, publiée par l'OBSERVATOIRE DE PARIS. In-8 (25×12); mensuel. Tome I: 1919.

Prix de l'abonnement annuel :

Paris..... 32 fr.
Départements et Union postale..... 34 fr.

Cette revue fait suite au **Bulletin astronomique**. Elle donne l'analyse de tous les travaux astronomiques récemment parus, les mémoires originaux étant réservés à une publication qui sera annoncée ultérieurement. Elle paraît mensuellement, par fascicules d'environ 48 pages chacun.