

COLLECTION PAYOT

Encyclopédie française de haute culture

LE VOLUME : 5 FRANCS

Les ouvrages de la COLLECTION PAYOT dus à la plume des savants les plus éminents sont conçus de manière à fournir dans toutes les matières à la fois une initiation pour les jeunes gens, une lecture d'un passionnant intérêt pour le grand public cultivé et un précis pour les spécialistes eux-mêmes.

N° 1. ÉDOUARD MONTET

Professeur de langues orientales
à l'Université de Genève, ancien Recteur

L'ISLAM

N° 2. CAMILLE MAUCLAIR

LES ÉTATS DE LA
PEINTURE FRANÇAISE
DE 1850 A 1920

N° 3-4. RENÉ CANAT

Docteur ès-lettres, Professeur de rhétorique
supérieure au Lycée Louis-le-Grand

LA LITTÉRATURE FRAN-
ÇAISE AU XIX^e SIÈCLE

N° 5. LOUIS LÉGER

Membre de l'Institut,
Professeur au Collège de France

LES ANCIENNES
CIVILISATIONS SLAVES

N° 6. PAUL APPELL

Membre de l'Institut,
Recteur de l'Université de Paris

ÉLÉMENTS DE LA
THÉORIE DES VECTEURS
ET DE LA GÉOMÉTRIE
ANALYTIQUE

N° 7. C^e DE CIVRIEUX

LA GRANDE GUERRE
(1914-1918)
APERÇU D'HISTOIRE MILITAIRE

N° 8. HENRI CORDIER

Membre de l'Institut

LA CHINE

N° 9. ERNEST BABELON

Membre de l'Institut,
Conservateur du Cabinet des Médailles,
Professeur au Collège de France

LES
MONNAIES GRECQUES
APERÇU HISTORIQUE

N° 10. GEORGES MATISSE

Docteur ès-sciences

LE MOUVEMENT SCIENTIFIQUE
CONTEMPORAIN EN FRANCE

I. LES
SCIENCES NATURELLES
(Voir N°s 41-44-45)

N° 11. D^r PIERRE BOULAN

Chef du service de radiologie
et d'électrothérapie
à l'hôpital de Saint-Germain

LES AGENTS PHYSIQUES
ET LA PHYSIOTHÉRAPIE

N° 12. HIPPOLYTE LOISEAU

Professeur de langue et de littérature
allemandes à l'Université de Toulouse

LE PANGERMANISME
CE QU'IL FUT — CE QU'IL EST

COLLECTION PAYOT

LOUIS DE LAUNAY

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

LA TERRE

SA STRUCTURE ET SON PASSÉ



PAYOT, PARIS

106, BOULEVARD ST-GERMAIN

1925

Copyright 1924, by Payot, Paris.

M. LOUIS DE LAUNAY

M. LOUIS DE LAUNAY est né à Paris le 19 juillet 1860. Élève de l'École Polytechnique en 1879, Ingénieur au corps des Mines en 1884, il débuta dans le Service des Mines à Moulins et commença alors les cartes géologiques du Plateau Central, qu'il a continuées depuis cette époque. Après des voyages d'exploration scientifique dans la Mer Égée, en Espagne, en Norvège, etc., il fut nommé professeur à l'École Supérieure des Mines en 1889 et poursuivit ses explorations dans les divers pays européens (notamment en Bulgarie), à Lemnos, à Rhodes, au Transvaal, en Laponie, au Spitzberg, etc.

Professeur à l'École des Ponts et Chaussées et à l'École des Sciences Politiques, membre de l'Académie des Sciences depuis 1912 et de l'Académie d'Agriculture depuis 1922, il a écrit de nombreux ouvrages de géologie, d'histoire, de philosophie, d'économie politique, de littérature.

Ses principales publications scientifiques sont les suivantes :

- L'ARGENT. (Baillière, 1895.)
- MINES D'OR DU TRANSVAAL. (Baudry, 1896.)
- DIAMANTS DU CAP. (Baudry, 1897.)
- TRAITÉ DES SOURCES THERMO-MINÉRALES. (Baudry, 1899.)
- GÉOLOGIE PRATIQUE. (Armand Colin, 1901.)
- LES RICHESSES MINÉRALES DE L'AFRIQUE. (Béranger, 1903.)
- FORMATION DES GITES MÉTALLIFÈRES (Gauthier-Villars, 1905.)
- LA SCIENCE GÉOLOGIQUE (Armand Colin, 1905.)
- HISTOIRE DE LA TERRE (Flammarion, 1906.)
- L'OR DANS LE MONDE. (A. Colin, 1907.)
- LA CONQUÊTE MINÉRALE. (Flammarion, 1908.)
- LA GÉOLOGIE ET LES RICHESSES MINÉRALES DE L'ASIE. (Béranger, 1911.)
- GITES MINÉRAUX ET MÉTALLIFÈRES. (3 vol., Béranger, 1912.)
- FRANCE-ALLEMAGNE. (A. Colin, 1917.)
- QUALITÉS A ACQUÉRIR. (Payot, 1918.)
- PROBLÈMES ÉCONOMIQUES D'APRÈS-GUERRE. (A. Colin, 1919.)
- OÙ EN EST LA GÉOLOGIE ? (Gauthier-Villars, 1921.)
- GÉOLOGIE DE LA FRANCE. (A. Colin 1921.)
- GÉOLOGIE ET MINÉRALOGIE A L'USAGE DES INGÉNIEURS. (Baillière, 1922.)
- DESCARTES. (Payot, 1922.)
- LA VIE DES MONTAGNES. (Fayard, 1924.)

TABLE DES MATIÈRES

<i>CHAPITRE PREMIER. — L'ASTRONOMIE DE LA TERRE.....</i>	5
I. — LA PLACE DE LA TERRE DANS L'UNIVERS.....	5
II. — LE PASSÉ COSMIQUE DE LA TERRE.....	15
III. — LA SOLIDIFICATION DE LA TERRE.....	22
<i>CHAPITRE II. — LE VISAGE DE LA TERRE.....</i>	27
I. — LES TRAITs CARACTÉRISTIQUES DE LA PHYSIONOMIE TERRESTRE. LA FORME RÉELLE DE LA SPHÈRE TERRESTRE. LE CONTRASTE DES DEUX PÔLES. LE VOLUME DES MERS. LA TORSION DES CONTINENTS, ETC.....	27
II. — LA PART DU PASSÉ DANS LE VISAGE ACTUEL DE LA TERRE.....	49
III. — LES FONDEMENTS ACTUALISTES DE LA GÉOLOGIE.....	54
<i>CHAPITRE III. — L'ACTIVITÉ GÉOLOGIQUE SUPERFICIELLE. L'ÉROSION ET LA SÉDIMENTATION.....</i>	61
I. — L'ÉROSION.....	62
II. — SÉDIMENTATION. LES ENSEIGNEMENTS DE L'OcéANOGRAPHIE SUR LA FORMATION DES SÉDIMENTS.....	68
III. — L'HORIZONTALITÉ PRIMITIVE DES SÉDIMENTS MARINS.....	81
<i>CHAPITRE IV. — L'INTÉRIEUR DE LA TERRE.....</i>	86
I. — OBSERVATIONS PHYSIQUES.....	86
II. — OBSERVATIONS GÉOLOGIQUES. LES THÉORIES DE LA COMPENSA- TION, DE L'ISOSTASIE, DU FLOTTEMENT, ETC.....	95
III. — LE FOND DES SÉDIMENTS. LES PROBLÈMES DES GRANITES ET DES GNEISS.....	100
<i>CHAPITRE V. — L'ÉVOLUTION DE LA STRUCTURE TERRESTRE. LES MONTAGNES ET LES MERS.....</i>	109
I — LES LOIS DE L'ÉVOLUTION STRATIGRAPHIQUE LES TRANSGRESSIONS ET LES RÉGRESSIONS.....	109
II. — LES CHAÎNES HERCYNIEUNE ET ALPESTRÉ EN FRANCE.....	118
III. — L'ÉVOLUTION DES ZONES OROGÉNIQUES.....	131
<i>CHAPITRE VI. — LES DERNIÈRES CONVULSIONS. TREMBLE- MENTS DE TERRE ET VOLCANS.....</i>	135
I. — DÉPLACEMENTS LENTS DU SOL.....	135
II. — TREMBLEMENTS DE TERRE ET VOLCANS.....	137

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays

CHAPITRE PREMIER

L'ASTRONOMIE DE LA TERRE

I. LA PLACE DE LA TERRE DANS L'UNIVERS

Dans un Univers qui n'est lui-même qu'une goutte d'écume au milieu de l'infini, une toute petite planète a réalisé les conditions exceptionnelles, miraculeuses de la vie. Support et origine matérielle de cette vie qui pullule à sa surface, la Terre est vivante et agissante par elle-même. Elle s'offre ainsi à notre pensée comme un corps organisé, dont chaque être vivant, à apparence individuelle, forme une cellule, constituée de cellules à son tour. Mais elle-même, indépendamment des organismes qui la peuplent, présente les caractères extérieurs de la vie et il ne lui manque que l'insufflation de l'esprit pour nous représenter, conformément aux imaginations des hommes primitifs, un étrange animal dont nous serions les parasites. Elle est née, elle se transforme, elle s'agite et se dirige vers la mort. Peut-être même projette-t-elle à travers les espaces, des éléments de matière ou des germes organisés, par lesquels elle se reproduirait ? Dans ce livre, qui ne doit pas être un banal manuel de géologie, mais où je désirerais plutôt répondre aux principales questions que soulève notre science, je vais essayer de raconter cette existence de la Terre, de la matière terrestre ;

je n'y aborderai pas, faute de place, l'autre grand sujet connexe, l'histoire de la vie. Cet accident singulier, si particulièrement important pour l'homme, ne nous intéressera ici que par ses répercussions sur l'histoire de la matière. Mais on ne saurait concevoir le rôle et le passé de la Terre si on ne la replace pas d'abord dans la chaîne illimitée dont elle forme un simple anneau et on risquerait de s'en faire une idée inexacte, si l'on n'envisageait pas en quelques mots certaines conceptions de physique nouvelles qui ont profondément transformé la physionomie classique de la Science.

A vrai dire, étudier l'Astronomie dégoûte un peu de ce cas particulier tellement infime que nous appelons géologie. Quand on vient de calculer des distances par siècles ou millénaires de lumière à raison de 300.000 kilomètres par seconde, quand on s'est demandé si notre univers est entouré de déserts comme une oasis dans l'immensité, quand on a scruté le pourquoi et le comment, les limites possibles et les contradictions probables de ce fait singulier que nous avons le tort de nommer attraction « universelle », on est un peu honteux d'attacher quelque importance à la construction momentanée des taupinières appelées l'Himalaya, le Chimborazo ou le Mont Blanc. Et pourtant ce point perdu dans l'immensité intéresse à peu près seul la plupart de nos contemporains qui s'en disputent avec âpreté une fraction, bien plus restreinte encore, une province ou un champ. L'homme a beau chercher à fuir sa trop absorbante humanité : il demeure égocentriste.

Et, d'ailleurs, pourquoi ne regarder que vers les espaces célestes dont l'étendue nous donne le vertige ? La Terre, à son tour, est un infiniment grand pour l'atome ou l'électron. La différentielle seconde n'a pas à envier la différen-

tielle première, ou à mépriser la différentielle troisième. La Terre est un agrégat d'atomes qui forme une particule dans un agrégat supérieur appelé Univers ; et cet Univers lui-même, cet ensemble de soleils visibles à nos regards, n'est probablement qu'une molécule dans quelque chose de plus grand, auquel nous ne savons même plus donner un nom. La seule attitude vraiment rationnelle reste toujours le prosternement de Pascal devant le mystère incompréhensible des deux infinis ; l'admiration pour le roseau pensant qui s'évertue à les pénétrer et qui les sent fuir devant son effort.

Il est vraiment un peu puéril de nier cet incompréhensible parce qu'il répugne à notre orgueil et de considérer comme un motif suffisant pour admettre une explication provisoire et tout au plus approximative la tranquillité d'esprit que nous y trouvons. Dire : « Ce que je ne comprends pas est absurde ; ce qui ne saurait être vu n'existe pas », c'est adopter le raisonnement classique de l'autruche, s'imaginant que ses ennemis ont disparu parce qu'elle s'est caché la tête contre un arbre. Les anciens, dont nous nous gaussons, n'argumentaient pas autrement lorsqu'ils imaginaient l'outré d'Éole pour expliquer les vents. Mais, si les infinis nous échappent, nous avons la possibilité d'étudier ce domaine strictement fini que forme la superficie terrestre. Et nous n'y trouvons pas seulement un avantage pratique ou la satisfaction de notre curiosité historique, mais la possibilité de retourner plus tard à l'astronomie avec des connaissances précises. Il convient de restituer à la Terre son rôle individuel dans la nature.

L'examen du ciel étoilé nous a donné le premier l'idée d'une mécanique rigide, à laquelle serait soumis le désordre des atomes ; et cette mécanique, nous avons pu ensuite l'étendre à bien des phénomènes, en remontant partout

mathématiquement de l'effet à la cause. Mais l'Univers n'est pas que géométrie et tout ce qui échappe à la géométrie ne nous est connu, au contraire, que par la Terre. Même matériellement, la Terre est un champ d'observation tangible, qui nous rassure dans le tourbillon des hypothèses cosmogoniques. Enfin, par la Terre seule aussi, nous avons appris à distinguer les éléments chimiques dont l'écorce terrestre nous fournit une collection dispersée. Et si, plus tard, l'analyse spectrale nous a amenés à soupçonner ailleurs des éléments qui nous échappaient ici-bas, nous n'avons fait là qu'utiliser des lois antérieurement établies dans nos laboratoires. Si nous n'avions eu à notre disposition que les raies spectrales éparses dans la lumière des soleils lointains, serions-nous jamais parvenus à établir une chimie, une physico-chimie et à reconnaître ainsi la constitution générale de la matière ?

Là, sur la Terre, nous avons trouvé le secret de cette chaîne sans fin, où le mouvement des soleils ou des univers devient assimilable à celui des électrons. Un degré de cette chaîne nous paraît très différent des autres parce qu'il est à notre mesure. S'il existait des êtres pensants, très petits ou très grands à nos yeux, dont le support serait un électron ou l'ensemble d'un univers, le monde, envisagé sur une autre échelle, leur semblerait sans doute analogue. Comme, jusqu'ici, le seul être pensant qui, à notre connaissance, s'occupe d'Astronomie est l'homme, c'est à notre échelle que nous devons regarder les choses et c'est la Terre que nous devons d'abord étudier.

Sur la Terre, nos sens nous révèlent un vain jeu d'apparences, qui n'ont peut-être pas d'existence réelle hors de notre esprit, mais qu'une vieille habitude héréditairement transmise nous a appris à considérer comme la première

des réalités. La physique et la chimie, deux rameaux jumeaux d'une seule science, s'efforcent, depuis des siècles, de classer ces apparences et de les ramener à leur principe. Nul n'ignore aujourd'hui que l'hypothèse la plus commode pour résoudre ce désordre complexe en l'Unité est celle des atomes ; et, comme un besoin instinctif, dont l'origine échappe à la physique, nous pousse à désirer l'Unité, nous admettons tous aujourd'hui, avec Épicure ou Lucrèce, que l'Univers est composé d'atomes.

Plus heureux et mieux armés que les philosophes grecs, ces atomes, ces électrons, nous les comptons, nous les assemblons, nous les « voyons » par les yeux de la pensée, gravitant, comme une planète autour de son soleil, les uns autour des autres. Et, par une seconde hypothèse métaphysique, nous supposons que le désordre de leurs mouvements doit obéir à des « Lois », résultant tout au moins du calcul des probabilités appliqué aux très grands nombres. Ainsi nous sommes arrivés à mettre de l'ordre dans le chaos et, comme au temps où l'homme imaginait Dieu à son image, les moins déistes des savants ont imposé à ce chaos la figure ordonnée et systématique d'une création.

Revenons, puisque c'est la base de la Science, aux apparences sensibles qui constituent les phénomènes et commençons par l'infiniment grand pour aboutir à l'infiniment petit.

La Terre occupe un point parmi les soleils de notre ciel étoilé. Ces soleils, nos yeux en distinguent quelques-uns ; nos instruments en découvrent beaucoup d'autres. Jusqu'où vont-ils et leur nombre est-il sans limites ? C'est la question qu'on s'est maintes fois posée et que l'on a prétendu résoudre dernièrement dans le sens d'un univers fini. On y parvient en appliquant le jeu artificieux des formules algébriques sur quelques postulatus arbitraires.

La première hypothèse et la plus invraisemblable consiste à admettre que la lumière des étoiles ne subit aucune absorption en traversant l'espace ; qu'elle n'est interceptée en venant jusqu'à nous par aucun cadavre de soleil¹. On suppose également que ces étoiles brûlent depuis un temps infini. On en conclut donc que, si l'espace était infini, avec une même densité d'étoiles, n'importe quel rayon dirigé de notre œil vers le ciel devrait rencontrer un astre de même intensité et que le rayonnement général du ciel devrait être partout identique à celui du soleil : tout au moins que l'espace devrait s'illuminer tout entier par rayonnement comme un four de verrier. Toutes ces conclusions se renversent si l'on admet que, dans la direction où le ciel nous apparaît noir, il y a, ou un astre éteint trop lointain pour se déceler dans nos calculs, ou un soleil dont l'éclat s'est évanoui en venant jusqu'à nous, ou un astre illuminé depuis trop peu de temps pour que sa lumière ait eu le temps d'atteindre la Terre. Comme, lorsqu'on suppose l'Univers fini, on lui attribue du moins des dimensions respectables correspondant à quelques milliards d'années de lumière, ces trois hypothèses contraires sont également plausibles.

Pour supposer notre univers fini, on est encore amené à le comparer avec une circonférence, sur laquelle on peut cheminer indéfiniment bien qu'elle soit finie. On fait intervenir une « courbure » de l'espace que l'on assimile avec la densité des étoiles, et on arrive à imaginer des rayons de lumière courbes qui, après avoir parcouru le pourtour de l'univers, reviendraient à leur point de départ : en sorte, comme on l'a remarqué en plaisantant, qu'un astronome,

1. Pour Arrhénius, le nombre des étoiles éteintes est infini. Pour Lord Kelvin, il est nul. Cette seconde hypothèse, que l'on érige volontiers en dogme, surtout quand on veut démontrer que notre univers est fini, paraît bien singulière.

regardant dans un télescope, y verrait son propre visage... plus jeune d'un milliard d'années. Dans cette hypothèse comme dans toutes celles du même ordre, on confond la visibilité avec l'être ; on calcule plus ou moins exactement les limites d'un univers visible et on énonce la conclusion en supprimant le mot visible. Cet univers se trouve ainsi — conclusion un peu imprévue pour des savants qui se piquent d'éviter l'égoïsme — avoir pour centre l'homme.

Je ne saurais m'étendre ici sur cette discussion ; mais il suffit de remarquer qu'à défaut d'observations impossibles, la logique amène à supposer des paquets de soleils rassemblés sur certains points d'un espace illimité, beaucoup plutôt qu'une répartition partout égale et, par conséquent, des univers (si l'on peut appeler cela un univers) séparés d'autres univers analogues par des distances telles que la vision resterait toujours impuissante à nous les déceler. Ce serait, dans une intégration démesurée pour nos dimensions humaines, l'équivalent de ce qui se produit pour nos paquets d'atomes.

Rapprochons-nous maintenant de la Terre sans y descendre encore. Notre univers visible et discernable est composé d'astres qui obéissent en principe à la loi dite de la gravitation universelle et qui, d'autre part, sont en mouvement, en même temps qu'ils rayonnent de l'énergie électrique ou lumineuse. Depuis Newton, qui a reconnu cette loi de l'attraction universelle, qui l'a formulée mathématiquement et qui l'a rendue ensuite vérifiable par d'innombrables observations, tout le monde parle de cette attraction sans en comprendre la nature et sans pouvoir assimiler cette force si spéciale aux autres forces physiques dont elle se distingue à tous égards. Voici qu'aujourd'hui on nous apporte un

commencement d'explication par l'électro-magnétisme ; on fait du moins un pas nouveau. Les conséquences sont importantes pour la conception que nous pouvons nous former de la Terre.

La gravitation, devenant une force électro-magnétique, agit, en effet, sur les autres forces du même genre et subit leur action, au lieu de rester, comme autrefois, dans son splendide isolement. De même que, dans le phénomène de Zeeman, un rayon lumineux est modifié par les forces magnétiques, de même il sera dévié par l'attraction d'un soleil. A vrai dire, nous savions déjà depuis longtemps, par la réfraction, que la densité d'un groupement d'atomes modifiait la direction d'un rayon lumineux ; mais il a fallu que l'observation nous revint du soleil pour que nous lui attachions son vrai sens. La conséquence est qu'aucun astre ne se trouve exactement dans la direction où nous croyons l'observer et il est merveilleux que les calculs de notre astronomie aient pu donner des résultats suffisamment exacts pour nous satisfaire, étant fondés sur des données erronées. Une autre conséquence est que le sens de l'attraction n'a aucune raison pour être partout, ni pour rester éternellement le même. Les particules qui tendent à se joindre peuvent s'écarter. Les assemblages qui se sont formés peuvent se dissoudre.

Nous aurons à revenir sur les deux conceptions contradictoires qui se disputent notre esprit dès que l'observation impérieuse des faits ne lui permet plus de croire à la permanence : croyance à une évolution continue ; présomption d'une récurrence périodique. Cela dépend un peu de la nature des esprits. Les uns se représentent les phénomènes comme une ligne droite allant d'un point à un autre ; les autres comme une circonférence ramenant périodiquement

au même point. Toute notre conception de l'Univers et, en particulier, de la Terre, se renverse suivant qu'on adopte l'une ou l'autre des deux idées. Dans un cas, la Terre a une histoire limitée dont l'origine est une naissance et la conclusion une mort. Dans l'autre, la mort, comme la naissance, n'est qu'une étape. Rien ne finit et tout recommence.

Nous verrons tout à l'heure — et c'est à vrai dire tout l'objet de notre livre — ce que l'on peut concevoir sur le passé de la Terre, sur un passé relativement court dont il subsiste des Annales. Franchissons, pour le moment, cet échelon intermédiaire et pénétrons plus avant dans la chaîne dont nous n'avons encore examiné que les plus gigantesques anneaux. La Terre, élément constituant d'un groupe, est le résumé d'un autre. Ce nouveau groupe, c'est ce que nous appelons, d'après l'impression qu'il produit sur nos sens, la matière terrestre. L'histoire de la Terre dont nous essayerons de raconter les épisodes les plus saillants, c'est, à vrai dire, dans son essence, l'histoire de cette matière terrestre, à laquelle se superpose l'histoire de la vie terrestre. Qu'est-ce donc que la matière ?... Je n'ajoute pas : Qu'est-ce que la vie ? Trop évidemment, je ne pourrais donner une réponse scientifique.

À l'aurore de la philosophie, les Grecs, qui ont tout imaginé dans le domaine de la pensée, comme ils ont tout réalisé dans le domaine du beau, avaient déjà décomposé le monde visible et tangible en atomes ; après quoi, de plus hardis, les dynamistes, avaient résolu à leur tour ces atomes en force. Pour les premiers, il n'y avait que matière ; pour les autres qu'énergie. Nous avons connu le temps où l'on professait avec assurance l'indestructibilité de la matière et celle de l'énergie. Aujourd'hui, nous subissons une vague de dynamisme. Une théorie nouvelle, vieille de trois mille

ans dans son germe métaphysique mais physiquement précisée, passionne tous les cerveaux. Jointe aux recherches récentes sur les atomes, elle aboutit à tout décomposer, matière et force en électrons, eux-mêmes inexplicables ¹. La physique se réduit à une géométrie. L'éther se confond avec l'espace. La matière pondérable n'est, comme la lumière ou l'électricité, qu'une apparence produite sur nos sens, par des électrons, par des supraélectrons, par des magnétons. Il est difficile de ne pas pousser plus loin et de ne pas considérer ces électrons eux-mêmes comme un concept de notre pensée, ou notre pensée elle-même comme un jeu d'électrons devenu conscient. De même l'espace euclidien est une illusion de nos sens, au même titre que la coloration de la lumière. Ce qui, dans un cas, est dit subjectif devient objectif dans l'autre ; on aboutit à la métaphysique et on risque de s'y perdre.

Précisons les conclusions physiques qui peuvent nous intéresser plus tard.

Il y a, nous dit-on, 91 atomes différents dans toutes les innombrables molécules qui composent les corps de la chimie. Dans chacun de ces atomes, un noyau positif d'hydrogène est entouré d'électrons négatifs dont le nombre, variable de 1 à 91, détermine la nature de l'atome. C'est pourquoi toutes les masses atomiques sont un multiple exact de l'hydrogène, les décimales résultant du mélange de corps voisins qu'on appelle les isotopes. Cet hydrogène lui-même pourrait être formé d'électrons agglutinés.

Nous sommes, on le sait, revenus au temps des alchimistes et il n'est plus question que de transmutations possibles ou réalisées. Ajoutons donc — et cela n'est pas sans consé-

1. Après quoi, dans la théorie des Quanta, certains physiciens remettent l'électricité en atomes.

quence pour la métallogénie — que la transmutation des divers éléments radioactifs paraît, dans tous les cas, aboutir à la masse atomique de 207, qui est celle du plomb... « Comment en un plomb vil, l'or pur s'est-il changé ? » Nos durées géologiques, si longues qu'elles nous semblent, sont peut-être un peu courtes pour avoir réalisé spontanément ces transmutations extrêmes. Néanmoins, nous n'avons plus le droit, comme on croyait pouvoir le faire il y a trente ans, de raisonner sur les formes de nos éléments chimiques englobés dans les profondeurs terrestres, comme si ces formes étaient immuables et définitives. J'ai, depuis bien longtemps, émis cette idée que certains groupements habituels de métaux dans les gisements, simplement expliqués autrefois par leurs affinités chimiques, pourraient avoir pour cause un semblable lien de famille ; et, quoi que je n'aie pas réussi à le constater dans le cas si habituel du plomb et de l'argent associés, l'induction ne me paraît pas entièrement à abandonner.

Aussi bien que la matière, l'énergie et les lois physiques qui la régissent peuvent évoluer. Appliquer les calculs de notre physique actuelle au passé n'est qu'une hypothèse.

II. LE PASSÉ COSMIQUE DE LA TERRE

Nous ne savons rien sur les causes qui ont pu rassembler, dans un point de l'espace, l'amas de matière, ou, en poussant plus loin l'analyse, la somme d'énergie dont se compose la Terre. Débris d'un assemblage plus vaste, ou condensation d'éléments disséminés dans une ou plusieurs nébuleuses avec chute de satellites, les hypothèses contraires sont également plausibles ; que l'on envisage d'ailleurs le développe-

ment historique, suivant une remarque précédente, comme une circonférence ou comme une ligne droite. Mais tout ce que nous pouvons observer dans les astres, ou, inversement, toutes les comparaisons que nous pouvons établir avec les produits de notre métallurgie, nous conduisent à présumer un état gazeux, fluide, antérieur à une consolidation de l'écorce superficielle, à la suite de laquelle aurait commencé la phase sédimentaire et orogénique, qui paraît souvent former à elle seule la Géologie.

Comment étaient distribués ces éléments gazeux, j'ai essayé autrefois de le reconstituer, non pas par une théorie préconçue, mais par le groupement raisonné des observations métallogéniques et je suis arrivé à cette loi, dont la simplicité tout au moins est séduisante : « Dans la Terre incandescente, avant sa solidification, les éléments chimiques se sont trouvés éloignés du centre, en raison de leur poids atomique, comme si les atomes dissociés et libres de toute combinaison chimique à de très hautes températures, avaient été uniquement et individuellement soumis à l'attraction universelle (autrement dit, dans nos théories actuelles, aux forces électro-magnétiques) et à la force centrifuge (équivalent statique de la rotation terrestre) ». Traduite dans un langage différent, cette loi signifie que, du centre à la circonférence, les corps chimiques devaient être alors répartis dans l'ordre des poids atomiques décroissants : les plus lourds, les plus chargés d'électrons négatifs, étant au centre et la périphérie présentant de simples noyaux positifs d'hydrogène. On a, par exemple, en partant de cette périphérie pour se rapprocher du centre : hydrogène (1) ; carbone (12) ; azote (14) ; oxygène (16) ; sodium (23) ; magnésium (24) ; aluminium (27) ; silicium (28) ; phosphore (31) ; soufre (32) ; chlore (35) ; fer (56) ; etc... pour

aboutir, comme termes extrêmes, au radium (225) et à l'uranium (229).

Je ne puis discuter ici cette loi plus que je ne le ferai pour les autres conclusions théoriques dont je dois me borner dans cet ouvrage à donner l'exposé doctrinal ; et l'on m'excusera pour la même raison de supprimer des « peut-être » dont ce premier chapitre surtout devrait être semé à chaque phrase. Je remarquerai seulement que, si notre loi peut sembler contestable et si elle constitue en somme une extrapolation hypothétique pour le noyau central et presque inconnu de la Terre, elle est, au contraire, rigoureusement adaptée aux faits dans les zones superficielles, seules accessibles à nos observations et pour lesquelles, par suite, il est permis d'en tirer les conséquences.

L'observation montre (bien qu'on ait pu récemment émettre un doute à ce sujet) qu'au delà de notre atmosphère proprement dite, la seule où nous puissions accéder, caractérisée par l'oxygène nécessaire à la combustion vitale, doit exister : d'abord une zone d'azote (peut-être en cristaux solidifiés), puis une zone d'hydrogène, comme cela se produit dans les protubérances solaires, dans les étoiles les plus brillantes et dans les étoiles temporaires. Les spectres des lumières émises par les étoiles très brillantes, que l'on considère comme les plus chaudes, se simplifient au point de se confondre avec celui de l'hydrogène. Il semble qu'en incorporant la plus grande somme d'énergie aux atomes, on les débarrasse ainsi de leurs électrons négatifs. A la base de l'atmosphère, le carbone (associé avec les trois éléments contigus : hydrogène, azote, oxygène) est l'élément fondamental de la matière organisée. Puis on atteint l'écorce silicatée qui est, avant tout, et essentiellement, un silicate d'aluminium, combiné à des bases ; sodium, magnésium,

2. DE LAUNAY.

etc. Sous cette écorce, nous plaçons les éléments dits minéralisateurs, comme le chlore et le soufre, dont le rôle est prédominant dans les cristallisations filoniennes : cristallisations limitées à une zone relativement superficielle de l'écorce. Enfin, plus bas encore, est la place des métaux, dont la répartition primitive devient problématique, mais que, pour bien des raisons, on est conduit à distribuer dans l'ordre de leurs densités, identique à celui de leur rareté, identique aussi à celui de leurs affinités chimiques. Ce qui revient à dire que, plus un corps a des atomes chargés d'électrons, plus il est lourd, plus il est rapproché du centre, plus il est réfractaire aux combinaisons chimiques avec d'autres corps et moins il a eu de chances pour parvenir dans la zone superficielle à la portée de nos exploitations.

Tirons de ces faits quelques conclusions. D'abord, comme il était logique de le prévoir, chacune des zones ainsi imaginées a pu fournir mécaniquement des parcelles aux autres zones ; elle a eu, de plus, tendance à se combiner avec les zones voisines et ces combinaisons ont été d'autant plus actives que l'on s'éloignait davantage du centre. D'où le rôle important joué, au-dessus de l'écorce terrestre, par les combinaisons d'hydrogène et d'oxygène (eau), de carbone et d'oxygène (acide carbonique), de carbone et d'hydrogène (matière organisée). Pour nous, la place rationnelle de ces trois combinaisons est donc au-dessus de l'écorce, quoique des circonstances diverses aient pu les faire pénétrer dans les fissures de celle-ci. C'est là une des raisons pour lesquelles je crois peu à de fortes réserves d'eau internes, aussi bien qu'à des carbures d'hydrogène arrivant directement du noyau igné : argument qui s'ajoute à toutes les observations de fait et se borne à les confirmer. L'eau qui existe dans l'écorce, à l'état de diffusion ou de combinaison et qui se

dégage dans le volcanisme, me paraît être de l'eau empruntée à la superficie, soit à une époque déjà ancienne, soit au moment même. On ne peut donc pas dire que, d'une manière absolue, elle augmente le volume des mers. Le carbone des terrains calcaires a passé presque tout entier par la vie. Le peu que l'on en observe dans les roches cristallines peut avoir en partie une même origine.

Une autre observation se rapporte aux deux minéralisateurs essentiels, le chlore et le soufre, dont la place initiale, si l'on se bornait aux seules constatations de la métallogénie, pourrait être discutée. Ces éléments existent en abondance à la surface et on les voit se dégager de la profondeur en proportion non moindre. On serait en droit de se demander si, comme pour l'eau, le cycle n'aurait pas son origine à la superficie. Nous arrivons au contraire, à conclure de notre loi que les manifestations superficielles de ces corps viennent surtout de la profondeur. Il a pu s'en volatiliser au début dans l'atmosphère par le brassage ordinaire des zones contiguës. Mais la plus grande partie s'est trouvée emmagasinée en profondeur et tend à en sortir par des fissures, augmentant constamment ainsi la quantité qui peut déjà s'en trouver au jour. La salure des mers aurait dès lors une tendance à s'accroître constamment, puisque les mers forment l'égoût universel où aboutissent toutes les matières solubles des terrains et des roches, malgré le phénomène inverse d'évaporation qui parfois soustrait du sel marin ou des sulfates à une lagune marine pour les incorporer quelque temps sur un continent dans la série stratigraphique. Cette idée s'accorde avec des théories d'un caractère tout différent fondées sur l'histoire de la vie.

Enfin il est bien remarquable que la même loi conduise à admettre un noyau central de radium et d'uranium : de

cet étrange radium qui échappe à toutes les règles ordinaires de notre physico-chimie ; élément si exceptionnellement rare à la surface et, en même temps, chargé à l'état potentiel d'une si grande somme d'énergie. Le radium représenterait ainsi la condensation suprême de cette énergie sous forme de matière, telle qu'elle se serait seulement réalisée en principe au centre de la Terre. D'une façon plus directe, nous ne savons absolument rien sur les états singuliers que peut présenter la Matière dans les parties profondes de la Terre. Nous savons seulement, par les mesures de la densité terrestre, que leur densité est forte. Mais nous ignorons ce que deviennent, dans ces conditions centrales, les lois physiques et chimiques, observées seulement dans les conditions superficielles. L'existence de radium central expliquerait, en même temps, un rayonnement calorifique, qui ne serait que la dépense d'une énergie antérieurement concentrée.

On remarquera, d'autre part, que la proportion totale des divers éléments chimiques dans la constitution terrestre ne nous est pas connue puisque nous abordons seulement un ou deux kilomètres d'épaisseur sur un rayon de 6.400. Nos idées actuelles sur l'unité de la matière nous font présumer que les divers corps chimiques ne se sont pas formés au hasard. En admettant que notre loi soit exacte, on pourrait alors se demander si des corps chimiques préexistants se sont classés par ordre de densité atomique comme dans une sorte de stratification sous l'effet de l'attraction centrale, ou si leur constitution chimique ne résulterait pas, au contraire, de leur position initiale et des conditions (pression, température, etc.), auxquelles ils auraient été soumis. Ils nous représenteraient alors la forme fossilisée de l'énergie que leur position primitive dans la sphère incandescente leur

aurait fait attribuer... Et, plus cette énergie accumulée serait forte, (exemple le radium), plus sa fossilisation serait précaire et plus elle se prêterait aisément à une transmutation.

Cette transmutation doit ainsi s'opérer dans le sens où nous supposons les atomes primitifs groupés le long d'un rayon terrestre, en éliminant des électrons et diminuant la masse atomique. De manière que les états chimiques existants à la surface pénétreraient peu à peu vers le centre, à mesure que la Terre perdrait son énergie interne et, sans doute, se refroidirait. La conséquence est que, si jamais, par impossible, l'homme pouvait pénétrer jusqu'au centre suffisamment refroidi de la Terre, il n'y trouverait pas le radium que nous supposons, mais ce radium déjà déchu, tout au moins jusqu'à l'état qui semble actuellement l'aboutissant des transmutations pour les diverses séries radioactives, à savoir le plomb.

Enfin, le fait qu'à la surface nous rencontrons pêle-mêle la série complète des éléments chimiques, démontre assez que la transmutation spontanée ne s'opère pas nécessairement, tout au moins dans les durées géologiques. Il est possible que, dans des conditions imprécisées, ces éléments obéissent, (suivant les cas) à deux processus différents : les uns évoluant par une désagrégation lente pour se mettre constamment en harmonie avec l'état qu'implique leur position sur le rayon terrestre et semblant ainsi s'adapter à leur milieu ; les autres réagissant contre cette action extérieure pour conserver obstinément leur état antérieur. Ces deux conditions opposées, que nous présentons à dessein dans des termes empruntés à l'étude des conditions vitales, correspondent, on le sait, à celles que nous rencontrons pour l'évolution des organismes.

III. LA SOLIDIFICATION DE LA TERRE

L'état fluide que nous supposons à l'origine et que l'on peut comparer à celui de notre soleil, a dû comporter des mouvements tourbillonnaires et des éruptions de gaz analogues à ce que nous croyons apercevoir dans la photosphère et la chromosphère solaires. Il en est résulté nécessairement des apports locaux venant des zones profondes vers la superficie : apports dont nous pensons notamment apercevoir l'indice dans certaines remarquables concentrations de métaux. Il a dû se produire, en même temps et pour la même cause, une certaine confusion des zones contiguës. Puis, par suite d'un abaissement de température, des éléments chimiques juxtaposés par leur masse atomique, silicium (28) et aluminium (27), se sont combinés avec les éléments des zones immédiatement supérieures : magnésium (24), sodium (23), oxygène (16) et le globe fluide s'est recouvert peu à peu d'une pellicule solidifiée, analogue au laitier qui se produit dans nos hauts-fourneaux vers 1200 à 1500°. On peut supposer que les premières scories ont été entraînées par des remous, puis ont fini par se prendre en masse, sauf à être localement crevassées ou refondues par la base, puis cristallisées de nouveau. L'atmosphère superposée devait exercer sur ces roches une pression considérable de 2 ou 300 atmosphères, qui tendait sans doute à les assimiler plutôt avec nos roches de profondeur qu'avec nos roches superficielles. Mais il est infiniment probable que, de cette première croûte (autrefois confondue par erreur avec les gneiss), tout a dû disparaître par refusion et que notre pétrographie n'a pas à en tenir compte.

Dès que cette écorce a été suffisamment épaisse pour s'interposer comme un écran entre le noyau resté igné et le froid absolu des espaces interstellaires, la fuite des calories vers l'éther a accentué ses effets à la surface. Des combinaisons ont eu lieu, dont certaines restituèrent momentanément un peu de chaleur. Dans la zone supérieure à l'écorce, où se trouvaient les zones gazeuses d'hydrogène, de carbone, d'azote et d'oxygène, ces combinaisons ont produit des carbures d'hydrogène, des cyanures, de l'acide carbonique et surtout des torrents d'eau.

Quelle était la quantité de cette eau, nous pouvons à peu près l'imaginer, si nous supposons, pour des raisons que j'expliquerai plus tard, une certaine constance dans le volume des mers. Les mers représentent actuellement une couche d'eau de 2.500 mètres répartie sur toute la terre. La teneur en eau des roches et des sédiments permet d'y ajouter 500 à 1.000 mètres. C'est donc au moins 3 kilomètres d'eau qui se sont abattus sur l'écorce et qui, on l'a remarqué, ont dû y produire des effets dynamiques, auxquels peuvent être, dans une faible mesure, attribuables des inégalités premières ayant exercé leur influence sur les phénomènes ultérieurs. On a parfois imaginé, en même temps, des pluies de sels. J'ai déjà dit pour quelle raison j'attribuais au chlore et au soufre une place initiale plus profonde. Cela n'empêche évidemment pas qu'il y ait eu une partie de ces métalloïdes dans l'atmosphère primitive. Mais il semble surtout que leurs fumerolles aient dû se dégager en abondance par les fissures d'une écorce peu épaisse. Combinées avec la dissolution des alcalis, ces fumerolles ont dû incorporer de suite à la mer une certaine proportion de principes salins, qui se sera ensuite constamment accrue par la continuation des apports internes et par le lessivage des roches.

Cette mer primitive, que l'on imagine à une température voisine de l'ébullition, devait couvrir toute l'étendue de la sphère, où elle n'a été localisée que par le commencement des plis orogéniques, sans doute très généralisés et, par conséquent, très peu saillants au début. Et, comme elle n'avait pas encore de rivages, soulevée ou abaissée tour à tour par le jeu des marées comme par une sorte de respiration rythmée, elle ne provoquait pas encore de sédimentation : tout au plus une faible érosion de son lit si on la suppose animée de déplacements violents.

A quelle époque, chiffrée en années, peut-on placer cette phase décisive, où s'est constituée approximativement l'apparence actuelle de notre Terre ? C'est une question que l'on pose souvent aux géologues. Mais mieux vaut avouer que nous n'avons aucun moyen sérieux de répondre¹. Tous les calculs que l'on a pu tenter pour évaluer les durées des temps géologiques, reposent nécessairement sur quelque hypothèse gratuite et c'est pour cela qu'ils sont aussi vagues et aussi contradictoires à cent millions d'années près. On peut procéder par la géologie ou par l'astronomie physique. Des géologues, tels que Dana, ont prétendu se fonder sur l'épaisseur des sédiments et sur leur durée de formation probable. Mais c'est comme si on appréciait minutieusement, à des décimales près, la vitesse d'usure d'une maison en négligeant la possibilité de tremblements de terre, ou comme si l'on appréciait les apports tranquilles d'une rivière sans tenir compte des crues. Certaines observations suédoises sur les lits alternants de la grande formation glaciaire sont la base très aventureuse sur laquelle se fondent les préhistoriens pour chiffrer en années le paléolithique. D'autres chercheurs ont pris pour point de départ la vitesse

1. Voir *Où en est la Géologie* ? ch. IV.

d'une transmutation en hélium dont nous ignorons en réalité le mécanisme actuel et l'allure dans le passé. Quant aux calculs des astronomes, ils laissent les géologues fort sceptiques ; surtout quand ceux-ci, comme il arrive souvent en France, ont quelque culture mathématique et savent ce qu'il faut penser de cette prestidigitation, ou de cette synthèse provisoire, que l'on appelle l'algèbre.

Disons de suite à ce propos qu'on voit souvent reparaître dans les livres, avec une apparence dogmatique, certains calculs de Lord Kelvin, de Joly, etc., les uns mesurant la vitesse du refroidissement terrestre, les autres démontrant que le refroidissement est plus que compensé par l'activité du radium. Les uns et les autres partent de suppositions sans fondement rigoureux et ne tiennent aucun compte d'une multitude d'observations superposées qui peuvent entraîner en sens contraire la conviction des naturalistes. De temps en temps, il tombe, dans cet appareil de précision illusoire, quelque aérolithe à la façon du radium qui force à tout reprendre de fond en comble, mais qui ne permet pas de conclure plus définitivement. La première qualité d'un savant est d'avouer son ignorance ; et la science, heureusement pour la curiosité des savants futurs, est beaucoup plus loin qu'on ne le croit généralement d'avoir résolu tous les problèmes.

BIBLIOGRAPHIE

1875. DANA. *Manual of Geology*.
1893. Sir WILLIAM THOMSON (Lord KELVIN). *Conférences scientifiques et allocutions* (traduction Lugo et Brillouin). (Gauthier-Villars).
1905. L. DE LAUNAY. *La Science Géologique* (Armand Colin.)

1907. L. DE LAUNAY. *L'Histoire de la Terre*. (Flammarion).
1908. PUISEUX. *La Terre et la Lune*. (Gauthier-Villars).
1909. ANDRÉ. *Les Planètes et leur origine*. (Gauthier-Villars.)
1909. JOLY. *Radioactivity and Geology*. (London, Constable.)
1910. ARRHÉNIUS. *L'évolution des mondes*. (Traduction Seyrig).
(Béranger.)
1911. POINCARÉ. *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*. (Hermann.)
1913. L. DE LAUNAY. *Traité de Métallogénie*. (Béranger.)
1918. ÉMILE BELOT. *L'origine des formes de la Terre et des Planètes*.
(Gauthier-Villars.)
1921. BOUSSINESQ. *Cours de Physique mathématique*, tome III (Gauthier-Villars).
1921. L. DE LAUNAY. *Où en est la Géologie ?* (Gauthier-Villars).

CHAPITRE II

LE VISAGE DE LA TERRE

I. LES TRAITES CARACTÉRISTIQUES DE LA PHYSIONOMIE TERRESTRE. LA FORME DE LA SPHÈRE TERRESTRE. LE CONTRASTE DES DEUX PÔLES. LE VOLUME DES MERS. LA TORSION DES CONTINENTS, ETC.

Expliquer le visage actuel de la Terre et reconstituer son évolution dans le passé en en déterminant les causes, est le but principal que poursuit la théorie géologique, envisagée comme une science historique ou comme une science physique. En même temps, nos recherches se trouvent atteindre un résultat pratique qui est de deviner ce qui existe en profondeur d'après l'examen de la superficie. Ce second problème, pour lequel notre ambition se borne jusqu'ici à un ou deux kilomètres d'épaisseur, se trouve, par suite de cette modestie, plus facile et plus proche de sa solution empirique. Mais on ne saurait le résoudre dans toute son amplitude, — qui, même pratiquement, peut s'imposer un jour à nos recherches, — sans avoir d'abord tiré au clair le premier.

Le visage de la Terre porte l'empreinte de tout son passé, comme un visage humain modelé par l'hérédité, creusé par l'âge, par les soucis et par les douleurs. La plupart des

géologues sont portés à lui attribuer une perpétuelle mobilité : chaque trait étant, il est vrai, influencé par les traits antérieurs, mais subissant aussi une action nouvelle qui peut rendre ces traits anciens méconnaissables. Leurs principaux motifs, résumés en deux mots, sont : la constatation du passage des mers à diverses reprises sur tous les continents, l'existence de plissements analogues à ceux qui forment nos montagnes dans tous les points des plaines, l'âge reconnu très jeune de certains reliefs tout particulièrement caractéristiques comme nos grandes chaînes actuelles avec leurs immenses charriages, la rencontre de roches solidifiées à l'air libre dans les profondeurs de l'Atlantique, les analogies ou les différences des provinces zoologiques qui conduisent à admettre une répartition ancienne de continents tout à fait différente de leur forme actuelle, etc., etc.

C'est cette théorie de la mobilité dirigée que je vais développer ici. Cependant il est incontestable que notre connaissance de la superficie elle-même est limitée à la terre ferme et notre connaissance de la géologie sous-marine (sur laquelle je reviendrai dans un chapitre suivant) à peu près inexistante. Comme je vais le rappeler bientôt, les sept dixièmes de la superficie terrestre sont occupés par les mers, pour le fond desquelles il n'existe encore aucun commencement de carte géologique. Le jour seulement où l'on aura tracé de telles cartes, on pourra cesser de raisonner par continuité et par assimilation. Jusqu'ici, on ne possède rien de semblable, en dehors de la Manche qui est simplement une vallée submergée, et une campagne de sondages récemment entreprise dans la Méditerranée n'a donné aucun résultat. Les efforts seront difficiles et coûteux pour pénétrer dans le sol géologique sous-marin en traversant les dépôts actuels et les produits d'altération, analogues à nos argiles

continentales, qui ont des chances pour former à peu près partout, dans les mers, un manteau assez épais. Les sondages ne pourraient, d'ailleurs, être vraiment instructifs que s'ils étaient très complets et très précis. On trouverait du jurassique marin au fond du Pacifique que cela prouverait seulement le passage de la mer en ce point pendant le jurassique, mais ne contredirait ni ne démontrerait une émergence crétacée.

Aussi a-t-on pu souvent soutenir l'existence, fort rationnelle, de certains traits permanents dans le relief de notre planète, et cette hypothèse a été particulièrement proposée dans le cas du Pacifique, parce que ses immenses étendues d'eau, pour la géologie desquelles on est à peu près désarmé, facilitaient le jeu des théories géométriques et des chimères cosmogoniques. On y a vu, par exemple, le point d'attache ancien de la lune ¹. En affirmant cette permanence, on raisonne un peu comme si un géologue de l'époque cénomaniennne, voyant la plus grande partie de l'Europe occidentale recouverte par une mer profonde, en avait conclu que cette mer avait toujours existé.

Des physiciens ont même affirmé, en dépit de toutes les observations, que les dernières variations de la Terre avaient été sans importance : ce qui supprimerait presque l'objet théorique de la géologie. Pour soutenir, au contraire, que ces dernières variations ont eu sur le relief une importance prépondérante, je m'appuierai simplement : sur l'âge bien connu de nos chaînes alpestres qui ont succédé si récemment à des sillons marins, sur l'invasion également récente de la mer dans de grands compartiments de la Méditerranée, sur l'âge récent de dénivellations qui atteignent plusieurs kilomètres d'épaisseur dans certains plateaux continentaux,

1. *Où en est la Géologie ?* p. 94 et 121.

ou encore sur l'affaissement que l'on observe aujourd'hui en divers points du Pacifique. La disparition ou l'avancée des mers, que nous constatons souvent historiquement sans aucune contrepartie apparente dans notre géologie continentale, suffisent également à nous faire penser que cette contre-partie s'est trouvée dans les zones actuellement océaniques et, par exemple, l'émergence définitive de l'Europe et d'une partie de l'Amérique à l'époque tertiaire pourrait bien avoir eu pour résultat la submersion d'anciens continents analogues aux nôtres et aussi complexes dans leur structure sous le Pacifique.

Je devais faire de suite ces remarques pour aller au devant d'objections séduisantes en théorie ; mais, cela dit, nous allons revenir le plus possible sur le terrain plus solide des faits, immédiatement interprétés. Cessant de rêver sur le fourmillement des astres dans le ciel étoilé, ou sur la première consolidation de notre globe, abaissons donc nos regards sur l'aspect actuel de la Terre et regardons-la avec attention, comme si nous n'avions encore aucune notion de géographie ni de géologie ! Nous la pratiquons depuis longtemps sur les cartes et sur le terrain, mais distraitement, comme nous voyons les personnes avec lesquelles nous vivons en familiarité, sans chercher à les analyser et à les comprendre. Poussons aujourd'hui plus avant et, avant de commencer nos courses sur le terrain, feuilletons les pages d'un atlas, où les reliefs des continents et des profondeurs marines ont été mis en évidence, en notant, chemin faisant, les observations que ce voyage rapide nous suggère !

Quand on parcourt la superficie de la Terre, on est surtout frappé par les différences locales de son relief, et ces différences nous apparaissent très grandes parce que nous

sommes très petits. Elles offrent, en effet, pour notre science, forcément limitée d'abord à l'écorce superficielle, une importance sur laquelle nous aurons à revenir. Mais, si l'on se représente la Terre dans son ensemble avec ses accidents réduits à leur échelle réelle, on s'aperçoit que l'on peut commencer par en faire abstraction. Les plus hautes cimes montagneuses atteignent à peine $1/720$ du rayon terrestre. Sur un globe ayant 10 mètres de diamètre, elles formeraient des proéminences de 7 millimètres et l'altitude moyenne des continents serait à peine, sur ce même globe, de 1 millimètre.

La forme générale de la Terre est, on le sait, approximativement celle d'une sphère. Quand nous n'en n'aurions aucune notion préliminaire, nous pourrions déjà le supposer par le seul examen de tous les corps célestes et par une assimilation naturelle avec eux. Newton, allant plus loin, a montré que ce corps sphérique avait la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati suivant son axe polaire et de nombreuses mesures de cet aplatissement, effectuées depuis lors par des procédés divers, ont prouvé qu'il pouvait être représenté par un nombre voisin de $1/299$.

Nous sommes ainsi conduits à nous représenter approximativement chaque méridien comme dessinant une ellipse et toutes ces ellipses méridiennes comme à peu près identiques. C'est là une constatation qui serait toute naturelle si la Terre était entièrement recouverte par la nappe fluide des Océans et susceptible par conséquent d'obéir à la force centrifuge. Mais nous ne constatons pas que les mers forment une large ceinture équatoriale en désertant les pôles, comme cela se produirait si la forme de la surface solide ne concordait pas avec celle des eaux ? Cette surface solide présente elle-même la forme d'un ellipsoïde et, de cette

constatation intéressante, on peut déduire avec une extrême vraisemblance que la Terre a pris en moyenne sa disposition actuelle alors qu'elle était à l'état de fluidité ignée. On peut également en conclure que l'axe de rotation terrestre a peu varié depuis cette consolidation ; ce qui serait tout naturel si la Terre possédait l'homogénéité dont la dotent parfois les physiciens ; ce qui est plus singulier étant donné son hétérogénéité, tout au moins dans les zones extérieures.

Mais, aujourd'hui, les géodésiens ne se contentent plus de cette première approximation ; ils prétendent connaître la forme exacte du sphéroïde terrestre afin de pouvoir, notamment, y observer des anomalies permanentes et des variations continues ou périodiques qui sont d'ordre à proprement parler géologique. Le problème que l'on se pose est, en définitive, de déterminer, par points, la surface terrestre en mesurant la distance de chaque point à un même centre, en calculant le rayon terrestre au point considéré, ou plutôt en traçant, suivant les divers méridiens, une série d'arcs elliptiques consécutifs avec leurs véritables rayons de courbure. On emploie pour cela deux méthodes qui sont : d'une part, l'observation de la verticale ; d'autre part, la mesure des oscillations pendulaires, et la concordance des résultats déterminés par ces deux méthodes montre leur degré d'exactitude. Mais il importe néanmoins de faire voir par quelques détails opératoires que l'on ne peut, jusqu'ici, pousser cette exactitude au delà d'une certaine limite, sans tomber dans de véritables cercles vicieux.

Commençons par *l'observation de la verticale*. Si nous supposons que nous connaissions exactement la direction de la verticale en deux points d'un même méridien et, par conséquent, la différence de latitude de ces deux points, la mesure de la distance entre ces deux points, ramenée par

des corrections au niveau de la mer, nous donnerait la figure exacte de l'ellipse méridienne qui passe par ces deux points avec son rayon de courbure. C'est la méthode classique, grâce à laquelle Maupertuis et la Condamine ont déterminé, en 1740-1745, l'aplatissement terrestre, grâce à laquelle aussi on a fait, dans la suite, de nombreuses mesures d'arc embrassant à peu près toutes les latitudes. Par ce procédé, on est déjà arrivé à cette constatation importante que les divers méridiens, ou même les fractions de méridiens, ne sont pas identiques, mais ont chacun leur physionomie propre, en sorte que la Terre n'est pas réellement un ellipsoïde de révolution, mais un tel ellipsoïde déformé. On constate également de faibles variations périodiques dans les latitudes et, par conséquent, dans la position des pôles : variations peut-être en partie attribuables à l'accumulation ou à la fusion des glaces polaires, mais pouvant tenir aussi à des attractions lunaires et solaires sur un globe élastique.

Seulement, je viens de le dire, tout cela suppose la détermination de la verticale : détermination, nécessaire pour connaître la latitude, qui est elle-même l'angle de cette verticale avec une parallèle à l'axe des pôles ; nécessaire aussi pour figurer la surface d'horizon qui lui est normale et sur laquelle on doit rabattre les mesures de longueur superficielles. Or, qu'est-ce que cette verticale observée suivant le fil à plomb ? Une résultante très complexe de diverses forces, les unes connues, les autres inconnues.

En deux mots, la position du fil à plomb est déterminée par l'attraction terrestre et par la composante verticale de la force centrifuge. Mais l'attraction terrestre est fonction de la répartition matérielle au voisinage du point considéré, répartition que nous ignorons et dont les effets sont parfois

tout à fait singuliers : par exemple, quant une montagne repousse le fil à plomb au lieu de l'attirer, comme si elle était creuse ; quant une mer l'attire au lieu de le repousser, comme s'il existait une condensation exceptionnelle de matière dense au-dessous d'elle. D'autre part, nous ne pourrions calculer la force centrifuge que si nous connaissions le rayon, c'est à-dire précisément un élément à mesurer. On n'arrive donc à un résultat approché que parce que ces deux influences perturbatrices, inégalité de la répartition matérielle au voisinage de la surface et différence de la force centrifuge pour une légère variation de rayon, sont, en réalité, très faibles. La même objection peut être faite à d'autres méthodes très perfectionnées, telles que le niveau d'eau de Michelson, utile cependant pour observer des variations locales accidentelles ou périodiques.

Ajoutons que, si nous prétendons déterminer le géoïde solide par rapport à l'ellipsoïde théorique qui devrait représenter la surface de niveau marine, nous rencontrons une autre grave cause d'erreur. La mer, en effet, n'est pas une surface de niveau. Attirée par le voisinage des continents, déformée par les courants et par les inégalités de densité qu'entraînent les différences de salure, elle peut subir des variations locales très notables. Donc, entachée par ces diverses causes d'erreur, la détermination des latitudes ne peut nous conduire directement à la solution précise du problème que nous nous sommes posés ; elle y amènera seulement par approximations successives. Cependant, elle semble déjà à elle seule démontrer ce fait curieux que la verticale d'un même point peut subir des variations journalières et d'autres à périodes plus amples, indépendamment des erreurs dues à la réfraction atmosphérique : soit que l'écorce subisse des mouvements de flexion élastique, soit

que l'axe des pôles ait un léger mouvement d'oscillation.

Le second procédé consiste dans l'*observation du pendule*. La formule qui donne la durée de ces oscillations dépend de l'intensité de l'attraction terrestre et de la force centrifuge qui, par sa composante verticale, agit en sens inverse. Or l'intensité elle-même est, avant tout, fonction de la distance au centre. Donc, quand on se rapproche du centre en allant par exemple de l'équateur au pôle, on voit le pendule battre de plus en plus vite. Si, dans une première approximation, on suppose la terre homogène, on peut, par une formule due à Clairaut, calculer la différence de distance au centre de deux points en y observant le pendule, et en déduire l'aplatissement polaire. Mais, ici encore, c'est géologiquement une erreur de supposer la terre homogène et l'on peut inversement se proposer de constater des anomalies dans la répartition de la matière terrestre par l'observation du même pendule. La connaissance de ces anomalies mettra alors en garde contre cette déviation possible de la verticale. Cependant la valeur moyenne de l'aplatissement terrestre déterminée par le pendule coïncide à peu près avec celle mesurée par la verticale et, dans ces limites, on doit y voir une confirmation de son exactitude ?

Sur ce géoïde déformé se superposent des saillies orographiques et des dépressions marines, dont j'ai remarqué tout à l'heure la faible importance par rapport au rayon terrestre, mais qui n'en offrent pas moins pour un géologue un intérêt de premier ordre, comme les indices évidents d'une activité interne.

La topographie marine présente, par définition même, avec la topographie terrestre, une différence capitale, c'est d'être, dans son ensemble, modelée en creux, au lieu d'être en relief, concave et non convexe. Quand des dépressions

de ce genre, plus petites, se produisent sur un continent, elles sont, elles aussi, remplies d'eau, qui leur substitue une surface plane, peu à peu fixée par les sédiments. Quand un relief se présente accidentellement dans les fonds marins, l'érosion tend à l'éliminer.

Cependant, sur ces deux courbures principales des mers et des continents, peuvent se greffer, dans les deux cas, des saillies et des creux : dans la mer, tantôt des massifs surélevés formant des hauts fonds ou des îles, tantôt des trous comme la fosse des îles Tonga ; sur les continents, des montagnes comme les Alpes, ou des abîmes comme ceux de la Mer Morte.

Ces accidents du relief n'ont aucun rapport direct avec le mouvement de rotation et la force centrifuge. Le seul fait qu'une chaîne montagneuse récente comme la chaîne ouest-américaine coupe l'équateur suivant une direction presque perpendiculaire suffirait à montrer que des influences toutes différentes sont intervenues dans le modelé terrestre ; influences que nous rapporterons tout d'abord en premier lieu à la contraction.

On a cependant fait des calculs pour montrer que le rayon équatorial n'avait pas dû varier. Quand même le fait serait vrai, ce qui paraît contraire avec l'allure des reliefs montagneux, la conclusion ne saurait s'étendre à l'ensemble de la sphère.

Si nous comparons maintenant deux cartes polaires, nous observons : au Pôle Nord, une base aplatie couverte d'une mer circulaire ; au Pôle Sud, une saillie montagneuse. C'est la remarque essentielle, sur laquelle se sont appuyés les essais tentés à diverses reprises pour ramener la forme théorique de la Terre à un tétraèdre ou plutôt un hexaèdre curviligne ¹.

1. DE LAPPARENT. *Traité de Géologie*, p. 947.

On peut ajouter que la grande cordillère ouest-américaine représente facilement une arête déformée et tordue d'un tel tétraèdre. Mais toutes les tentatives ont échoué pour trouver, dans le relief terrestre, la place des autres arêtes. De plus, il faut bien remarquer que la base polaire serait singulièrement restreinte et que les 3.000 mètres d'eau environ qui la recouvrent représentent seulement l'épaisseur moyenne des mers supposées distribuées sur toute la planète. La différence de 6 kilomètres, qui peut exister entre la saillie des deux pôles, n'est pas le tiers de la différence entre le rayon polaire et le rayon équatorial (21 kilomètres) et il est beaucoup plus naturel de voir, dans l'aplatissement arctique, un effet de la rotation, contrebalancé partiellement dans l'Antarctide par un phénomène tout à fait différent, et très récent, de plissement orogénique. En outre, dans l'idée d'une contraction tétraédrique, on ne saurait quel rôle attribuer aux crêtes alp-himalayennes et à la dépression méditerranéenne, prolongée par le Golfe du Mexique, qui sont deux des traits fondamentaux de notre planète.

Ce qui avait fait songer à ce système tétraédrique, adopté un moment par de nombreux savants, c'était le désir d'attribuer à la contraction terrestre une tendance géométrique, la sphère ainsi contractée dans son volume ayant eu une tendance à garder le plus possible la même surface : d'où la recherche d'un polyèdre offrant la plus grande surface pour le plus faible volume. Mais, contrairement au mot de Leibniz, il faut nous résigner à penser que le Créateur, en modelant la Terre, n'a pas fait de géométrie : tout au moins pas une géométrie aussi simple.

Nous retiendrons plutôt de l'observation précédente l'idée d'une dissymétrie fondamentale entre les deux héli-

sphères, idée qui se reproduit géographiquement dans les observations les plus diverses (distribution des continents et des mers, forme des continents, etc.) et que la géologie vient confirmer en nous montrant, dans l'hémisphère Nord, de grandes plateformes très anciennement consolidées (dont l'une surélevée et perforée de volcans dans le Groenland) : plateformes qui n'ont aucun représentant dans l'hémisphère Sud, tout au moins dans les parties émergées de l'hémisphère Sud. Nous aurions pu croire en principe que les deux extrémités de l'axe terrestre devraient être semblables, l'équateur formant un plan de symétrie. La réalité est toute différente et les deux hémisphères ne se ressemblent en aucune façon.

Si nous poursuivons notre examen sur la carte, nous constatons aussitôt l'étendue énorme occupée par les Océans. On a dit que l'humanité était composée de plus de morts que de vivants ; la superficie terrestre est composée de plus d'Océans inhabitables à l'homme que de terres fermes. Sur 510 millions de kilomètres carrés, 365, ou les sept dixièmes, sont occupés par les eaux ; 145, ou trois dixièmes seulement, par les continents. Cette inégalité s'accroît si on prend l'hémisphère austral, où il n'y a que 44 millions de kilomètres carrés de continents. On a pu tracer un hémisphère ayant son pôle en Nouvelle Zélande, où le rapport de la terre ferme à l'eau est de 1 à 85. En volume, la différence est encore plus forte. Le volume des mers, estimé à 1.500 millions de kilomètres cubes, atteint quinze fois celui des continents.

Aussitôt, dans l'ordre d'idée historique qui nous occupe ici, une question s'impose à nous. Ce volume, cette répartition superficielle des mers, ont-ils changé au cours des temps ? La question du volume surtout entraîne des con-

séquences graves pour toutes les hypothèses dont nous avons dit un mot sur le balancement des mers. Si nous étions sûrs que le volume d'eau ne s'était jamais modifié, si la répartition et la profondeur moyenne, elles aussi, étaient restées à peu près les mêmes, nous pourrions affirmer que toute avancée de la mer constatée dans une région a eu pour contrepartie un retrait (souvent plus difficile à démontrer directement) dans une autre, comme nous l'indiquions tout à l'heure pour le Pacifique. C'est, malheureusement, une question sur laquelle on discute, comme sur beaucoup d'autres, où l'on est obligé d'abandonner l'observation pour le raisonnement.

Les mers ayant été formées dès la première heure par la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène atmosphériques, on aperçoit deux phénomènes qui ont pu modifier leur volume en sens contraire. Tout d'abord, les oxydations, qui sont la règle au contact de nos roches avec l'air, ont eu pour résultat certain une absorption d'eau et un dégagement d'hydrogène : celui-ci en partie incorporé par la matière organisée, en partie diffusé vers les zones les plus hautes de l'atmosphère. Les réactions réductrices, étant consommatrices de chaleur, n'ont guère de chance pour s'accomplir à la surface, si ce n'est, pour une proportion infime, dans nos appareils industriels.

Inversement, le volcanisme apporte sans cesse à l'air des quantités d'eau vaporisées, dont le total pourrait paraître important si on les considérait, ainsi qu'on l'a proposé à diverses reprises, comme des eaux neuves ou juvéniles, venues pour la première fois au jour. J'ai déjà expliqué les raisons d'ordre général qui me portent à admettre une opinion contraire. Pour moi, la place normale de l'hydrogène et de l'oxygène était au-dessus de l'écorce terrestre et c'est

ce qui a produit les mers. Il est vrai que la scorie superficielle a dû emmagasiner une certaine quantité d'eau dans sa cristallisation, de même qu'elle a absorbé de l'oxygène et probablement aussi un peu de carbone. Cette eau incorporée dans les roches s'en exhale par leur refusion et peut contribuer au volcanisme. Mais elle tend ensuite à redescendre en profondeur, soit mécaniquement, par un simple circuit souterrain, soit chimiquement par l'incorporation des sédiments refondus dans les roches cristallines, à la faveur des mouvements orogéniques et du métamorphisme. C'est toujours la même eau qui reparait dans ces phénomènes ; et la quantité d'eau soumise à ce circuit doit être faible par rapport au volume des mers.

En ce qui concerne l'oxygène, toutes les observations sur les filons montrent que l'oxygène y disparaît quand on s'enfonce. Il en est de même pour les roches dites de profondeur, moins oxydées que les roches superficielles. Pour l'eau à l'état libre, le fait n'est guère plus douteux. Cette eau remplit les vides profonds de l'écorce et c'est pourquoi nos travaux de mines la rencontrent toujours en descendant. Mais ces fissures mêmes cessent bientôt. Et la seule observation du degré géothermique démontre que, dans de telles fissures, si elles existaient plus bas, l'eau, à partir d'une dizaine de kilomètres, atteindrait sa température critique de 364°. Elle y serait donc en vapeur, quelle que soit la pression et tendrait à remonter. Si les roches cristallines ont exercé une action sur le volume des mers, ce serait donc tout au plus par une absorption correspondante à l'épaississement de la croûte scoriacée et au refroidissement corrélatif de cette écorce. Cette dernière influence est elle-même toute problématique, puisque nous ne savons pas si cette base de l'écorce est encore à l'état de silicates et non à l'état

de métaux solidifiés. Nous n'avons, en résumé, aucun motif pour admettre une variation notable dans le volume des mers et, s'il s'en est produit une, nous ignorons dans quel sens.

Le volume des mers étant ainsi supposé constant depuis la formation de l'écorce, il faut que leur profondeur ou leur étendue relative aient augmenté, puisque nous sommes, on le verra, conduits à admettre une réduction progressive de la superficie terrestre par la contraction. Divers motifs, dont nous aurons à reparler en étudiant l'évolution du relief, nous conduisent à penser que les irrégularités de ce relief ont dû s'accroître avec le temps, en sorte que la première hypothèse serait préférable à la seconde. Probablement la mer a dû commencer par couvrir toute l'étendue avec une épaisseur à peu près uniforme et des rides, bientôt effacées, ont dû s'y produire, comme les mouvements généraux des eaux et comme les courants atmosphériques, dans un sens déterminé par la rotation combinée avec l'attraction luni-solaire. C'est certainement la phase où l'écorce était la plus plastique et où elle a dû obéir le plus facilement aux forces astronomiques. En même temps, les efforts de tension n'étaient pas encore influencés, comme ils l'ont été plus tard, par toute la superposition compliquée des mouvements antérieurs. Quand nous étudierons l'histoire des plissements, nous verrons que, dans la suite, plus l'histoire de la Terre s'est avancée, plus les résultats des forces dynamiques ont localisé leur action sur une zone étroite de la surface et plus, sans doute, ces effets se sont accentués, tandis qu'ils prenaient l'allure de crevasses et de failles au lieu de simples plis.

Après quoi, dans une période finale qui va peut-être commencer bientôt, la croûte, devenue suffisamment épaisse

sur toute son étendue, résistera entièrement aux efforts de dislocation et se comportera comme une voûte solide, quand bien même, à sa base, il tendrait à se former des vides. Alors les continents, obéissant à la loi générale des érosions sans compensation d'origine interne, se détruiront peu à peu et l'aspect final de la Terre pourra ressembler à celui des premières heures par l'extension d'une mer uniforme, mais d'une mer refroidie ou même glacée, sur toute sa superficie.

Continuant à examiner la carte, nous observons que trois grands continents, l'Amérique, l'Afrique et l'Inde se terminent en pointe vers le Sud, tandis qu'ils s'élargissent vers le Nord. On peut encore y ajouter le Groenland. L'Australie fait exception.

Une autre remarque souvent faite sur la structure de la Terre est la double torsion que l'axe du continent américain paraît avoir subie : de l'Ouest à l'Est dans l'hémisphère Nord ; de l'Est à l'Ouest dans l'hémisphère Sud, et de nouveau vers l'Est à la Terre de Feu, suivi dans ses sinuosités par une torsion pareille de l'axe Atlantique. Avec un peu de bonne volonté, on peut retrouver une torsion pareille, mais déplacée du Nord au Sud et plus étalée horizontalement, dans la forme de l'Afrique, ou même dans celle de l'Australie supposée rattachée au continent asiatique et plutôt dans la courbe dessinée autour de l'Australie par la presqu'île de Sumatra, Java, la Nouvelle Guinée, la Nouvelle Calédonie et la Nouvelle Zélande.

D'une façon plus générale, c'est, d'ailleurs, un fait reproduit de tous côtés que ces torsions des saillies terrestres, et, particulièrement des chaînes montagneuses, en sinuosités successives ; tantôt, comme ici, autour d'un méridien ; tantôt, comme pour le système des chaînes Alp-Hima-

layennes, autour d'un parallèle ; tantôt, comme pour les guirlandes d'îles qui bordent à l'ouest l'Océan Pacifique, suivant la bissectrice des parallèles et des méridiens. Rien de plus faux que d'attribuer à un pli montagneux une direction rectiligne. Quand on trace sur un planisphère ces lignes sinueuses qui représentent des saillies ou des fractures récentes, on a seulement l'impression d'un crevassement irrégulier et sans plan arrêté, rappelant vaguement ce qui se produit sur un ballon de caoutchouc enduit de cire, lorsqu'il se dégonfle.

En somme, les principales saillies actuelles s'alignent sur deux directions à peu près rectangulaires : celle de la chaîne Alp-Himalayenne et du Thibet, celle des Montagnes Rocheuses et des Andes. Tout le vieux continent est dominé par la première direction équatoriale ; le Nouveau Monde et le Pacifique par la seconde. Géologiquement, nous sommes portés à considérer la direction équatoriale comme due à un très ancien plan de plissement, les directions plus ou moins méridiennes comme produites souvent par des craquements récents.

Aussi bien dans le nouveau monde que dans l'ancien, les saillies s'abaissent vers le Nord et l'on n'a plus guère au delà du 60^e degré que de grands plateaux plongeant en pente douce sous les mers arctiques sans brusques accidents de relief. Au contraire, dans l'hémisphère Sud, les crêtes des Andes, de la Nouvelle-Zélande et les deux cordillères qui longent l'est de l'Afrique Australe et l'est de l'Australie ont une tendance à venir converger vers le Pôle Antarctique, séparées par de profondes dépressions marines.

La forme d'équilibre tend ainsi à se réaliser dans le Nord, que nous considérons comme géologiquement plus vieux et depuis longtemps immobilisé. On s'y rapproche de cette

mer à la profondeur constante que nous supposons devoir être la disposition finale et les fonds mêmes de plus de 3.000 mètres rencontrés par l'expédition de Nansen représentent seulement, nous le remarquons tout à l'heure, l'épaisseur d'eau moyenne qui existerait sur toute la terre si le relief continental avait disparu. L'Antarctide se comporte inversement comme une zone jeune et encore en évolution, où les plissements futurs peuvent s'accroître, avec peut-être plateau surélevé jouant le rôle du Groenland symétriquement par rapport à la chaîne andine.

Un autre fait très remarquable et sur lequel on a, avec raison, appelé l'attention dans certaines théories, est le parallélisme des rivages sur les deux côtés de l'Atlantique. Nous verrons que cette mer se présente à nous comme le produit de crevasses récentes, et, lorsqu'on regarde la carte, il semble en effet qu'un mouvement de compression est-ouest suffirait pour faire rentrer la bosse du Sénégal dans le Golfe du Mexique ou, inversement, celle du Brésil dans le Golfe de Guinée, en rapprochant et recollant l'un contre l'autre ces deux compartiments disloqués d'un même jeu de patience. Le Groenland, lui aussi, viendrait ainsi s'appliquer au Canada et à la Scandinavie. Pour nous, c'est une preuve ajoutée à d'autres, que cette allure est le résultat d'un fractionnement dont les tronçons intermédiaires se sont relativement affaissés. On a cru pouvoir aller plus loin et en conclure que ces fragments d'écorce disjoints avaient flotté et flottaient peut-être encore sur la masse ignée comme les tronçons d'une banquise. La théorie que l'on en a déduite n'est pas nécessaire et soulève de fortes objections. Mais, dans toutes les hypothèses, on est conduit à se demander si ce mouvement d'écartement possible (localement opposé à la contraction plus générale) est achevé, ou s'il se continue en

éloignant peu à peu l'Amérique de l'Europe d'une quantité qui devrait être alors mesurable.

Enfin, en ce qui concerne le relief, j'ai déjà fait remarquer l'existence de grands plateaux surbaissés dans l'hémisphère Nord, à peine interrompus par des mers assez peu profondes, Baie d'Hudson, Détroit de Davis et mer de Baffin, nord de l'Atlantique. Ces plateaux s'étendent à peu près du 50^e au 75^e degré (le Groenland seul atteignant 3.000 mètres). Dans l'hémisphère Sud, on retrouve d'autres grands débris de plateaux anciens, mais beaucoup plus distants les uns des autres et beaucoup plus rapprochés de l'équateur, qu'ils dépassent par endroits vers le nord : Brésil, Afrique Australe, Madagascar, Inde, Australie. Puis, à partir du 45^e degré, on n'a plus guère que de la mer jusqu'au relèvement de l'Antarctide vers le 70^e degré. C'est encore un exemple de la dissymétrie entre les deux pôles et entre les deux hémisphères. D'une manière générale, dans l'hémisphère Sud, la masse terrestre, en grande partie submergée, a sa superficie plus rapprochée du centre ; l'écorce est probablement moins épaisse que dans l'hémisphère Nord. Elle représente, par conséquent, un poids moindre, si la densité y est égale.

Les montagnes actuelles occupent, dans cet ensemble, une place relativement restreinte. Et leur allure plissée, avec cette accumulation de plis parallèles, qui est, par exemple, si caractéristique dans l'Asie Orientale et dans l'Europe Centrale, ne ressemble en rien à la disposition par cassures aux bords écartés signalée tout à l'heure dans l'Atlantique. La partie des continents où ces montagnes se développent, semble ainsi accuser un relief très différent de celui qui prédomine sous quelques-unes des plus grandes mers.

Cependant, à moins d'admettre que le modelé des fonds marins ait été fait par les mers elles-mêmes (ce qui, en

dehors des nivellements sédimentaires, nous paraît bien improbable), ou que le relief des saillies continentales soit dû à leur exposition à l'air (ce qui est vrai seulement pour l'érosion), il n'y a aucune raison pour que le relief océanique soit, dans ses grandes lignes, différent du relief continental. La théorie d'une abrasion marine ayant toujours précédé les transgressions marines est abandonnée. On pourrait seulement supposer une telle différence de principe si on admettait que la place des mers ait été marquée depuis l'origine et, par conséquent, que les continents aient eu le monopole des déplacements ultérieurs. Nous avons déjà combattu cette opinion, qui serait tout au plus soutenable pour le Pacifique ou pour l'Atlantique méridional.

Dès lors, l'influence propre à l'émergence ou à la submersion se borne à un processus différent d'aplanissement, qui, d'une manière plus ou moins active, tend également à supprimer les reliefs. Sur les continents, l'érosion et l'alluvionnement abattent les saillies et comblent les creux. Dans le fond des mers, l'érosion, qui a pu jouer un rôle aux périodes primitives antérieures à la vie, quand la température et les dégagements de vapeurs devaient entraîner des courants violents, est depuis longtemps annihilée, faute de courants ; il reste seulement l'accumulation des vases organisées et de quelques apports terrigènes qui aboutit, comme sur les continents, à niveler. Les efforts orogéniques, cause de grandes dénivellations par surrection ou par affaissement, n'ont aucune raison pour s'être comportés différemment des deux côtés de cette ligne de repère empirique et, en somme, arbitraire, que constitue le rivage marin. Le niveau que ce rivage occupe tient au volume des mers originellement précipité. Ce volume aurait pu être plus élevé ou plus faible. Dans l'un des cas, une grande partie des continents

appartiendrait au domaine marin et inversement dans le second cas. Dans la différence de forme que semblent présenter parfois la topographie marine et la topographie continentale, la sédimentation sous-marine et l'érosion continentale doivent, chacune à leur manière, jouer un grand rôle. Peut-être aussi faut-il faire intervenir une autre cause toute empirique, tenant à la manière dont nous déterminons le relief sous-marin par une série de sondages. Si on déterminait la topographie des Alpes en jetant de temps en temps un câble du haut d'un ballon, on aurait probablement un résultat très différent de la réalité.

Cela dit, on constate que souvent les rides montagneuses terrestres sont flanquées d'un fossé parallèle qui en exagère le relief et la dissymétrie. Ce fossé peut avoir été comblé peu à peu, ou s'être trouvé dès l'origine au-dessus de la mer. Le long des Alpes, nous avons ainsi la plaine de la Lombardie, qui, sur un plan en relief, donne, comme la vallée du Rhin, l'impression d'un large fleuve de boue horizontal, et dans laquelle on ignore l'épaisseur que représentent les sédiments. Au sud de l'Himalaya, la fosse des Siwalik, remplie d'apports alluvionnaires, joue un rôle analogue. A l'ouest de la chaîne Andine, la dépression descend à 6.500 mètres au-dessous de la mer. Sur l'autre bord du Pacifique, où la saillie montagneuse est beaucoup plus faible, le fossé s'approfondit à 8.500 mètres. Le long du Japon et de l'Insulinde, on a partout l'impression d'une Alpe submergée se décelant au jour par ses sommets ou par ses rides les plus hautes. Des montagnes comme les Andes apparaissent ainsi formées d'un double pli en relief et en creux, le pli en creux ayant pu être assez prononcé pour amener l'envahissement de la mer. C'est par une application de la même loi qu'à une époque antérieure, où la ride était encore à peine

indiquée, un sillon marin de faible profondeur a pu jalonné l'emplacement actuel des Alpes et il semble, d'une manière générale, que les montagnes appartiennent à des zones particulièrement fragiles et élastiques, dites géosynclinales, dont le profil implique presque évidemment une compression, ayant pu succéder à un effondrement.

D'autre part, les rivages marins peuvent être, nous l'avons vu, provoqués, tout différemment, par de simples cassures et alors aucune ride terrestre ne s'adosse plus à la mer. C'est ce qui se produit pour l'Atlantique. De même, dans l'intérieur des mers, des accidents brusques du relief peuvent se produire par des fosses rectilignes, telles que l'abîme des Tonga, analogues à celles qui, dans notre géologie terrestre, ont constitué la vallée du Rhin, la Limagne, ou, sur une échelle plus vaste, la ligne des Grands Lacs africains, la Mer Rouge, et la Mer Morte. Il existe des compartiments marins qui ressemblent au Plateau Central, au Colorado, ou au Mexique submergés. Et, le long de cassures semblables ayant donné issue aux magmas ignés internes, on peut rencontrer des événements volcaniques qui ont surgi sous la mer en s'élevant de plusieurs milliers de mètres comme ils l'ont fait sur les continents, en sorte qu'il leur est arrivé d'émerger. Ce volcanisme a produit nombre de petites îles dans l'Océan et paraît déterminer aussi, dans les profondeurs marines, d'autres événements volcaniques invisibles à la surface, mais révélés par des secousses, des ras de marée et, solidairement, des séismes auxquels ils donnent lieu.

II. LA PART DU PASSÉ DANS LE VISAGE ACTUEL DE LA TERRE

Depuis le commencement de ce chapitre, nous avons pour ainsi dire abandonné la géologie, entendue au sens où l'on restreint habituellement ce mot, pour nous borner à la géographie physique, qui étudie en somme l'époque actuelle de cette géologie. Si l'espace ne nous était limité, un examen plus complet des formes terrestres et des diverses questions qui s'y rattachent, climats, courants marins, rivières et lacs, érosions fluviales, glaciation, sédimentation marine, biogéographie, etc., nous aurait apporté encore bien des enseignements utiles ; et, souvent, dans la suite, nous serons amenés à invoquer des observations de ce genre que nous supposerons connues. La géographie physique constitue la base actualiste de la Géologie : base dont il ne faut pas exagérer le rôle au point de nier l'évidente évolution qui rend les phénomènes actuels différents des phénomènes anciens, mais qui nous permet cependant d'apercevoir les erreurs où nous conduiraient de trop arbitraires conceptions astronomiques ou physiques. Nous sommes maintenant armés pour passer du sol au sous-sol et rechercher, sous le visage présent, les traces de la vie antérieure et des épreuves passées, les cicatrices des blessures anciennes, les déformations de la vieillesse qui ont peu à peu modelé la structure.

Dans le visage de la Terre, tel qu'il se montre au dehors, et tel que l'observerait d'abord un étranger à notre planète, pour lequel tout ici-bas serait nouveau, les traits les plus éphémères sont ceux qui attirent d'abord l'attention, parce qu'ils se superposent à tout le reste, parce qu'ils occupent

4. DE LAUNAY.

les regards en changeant sans cesse, parce qu'ils ont pour effet d'alimenter, de faciliter ou de gêner l'existence humaine.

Nous commençons par voir cette parure de végétation, de prairies, de forêts et de cultures qui change avec les saisons. Nous voyons s'agiter les hommes et remuer les animaux, qui nous intéressent surtout dans la proportion où ils nous sont utiles et nuisibles. Ce qui appelle ainsi notre attention, c'est la vie organisée aux multiples formes et il nous semble volontiers que la Terre ne pourrait se passer d'elle ; que, sans elle, elle ne serait plus la Terre. Nous remarquons encore les produits de l'activité humaine, les villes, les routes, les chemins de fer, les canaux et les ports. Et ceux qui n'ont jamais eu aucune préoccupation géologique ont peine à s'imaginer qu'on puisse pénétrer plus avant, ou ne s'imaginent pas qu'il y ait autre chose. Les plus raffinés croient d'ordinaire que, seules, des circonstances très exceptionnelles, comme les travaux de mines ou les sondages, permettent de reconnaître quelque chose au-dessous de ce manteau. Ils se représentent volontiers les géologues armés d'instruments puissants pour pénétrer souterrainement. Les parties profondes de la Terre sont restées longtemps les lieux redoutables, inférieurs, le royaume de la mort, les Enfers.

C'est cet état d'esprit instinctif qui a retardé si longtemps l'apparition de notre science. La géologie est plus jeune de deux ou trois millénaires que l'astronomie et, à la fin du XVIII^e siècle encore, Voltaire se croyait très spirituel en plaisantant ceux qui voulaient voir dans les coquillages fossiles autre chose que la trace du passage des pèlerins. Il est vrai que le préjugé anticlérical contribuait à le troubler et qu'il s'agissait pour lui de combattre la tradition d'un déluge. Mais il n'était pourtant que de deux siècles en

retard sur les premiers observateurs perspicaces, un Léonard de Vinci ou un Palissy.

Cependant, on a commencé de bonne heure à dessiner et à décrire certains traits de la géographie physique qui semblaient présenter un caractère de constance et d'antiquité particulier. Le nomade, dans ses courses, rencontre des fleuves, des montagnes et des mers, reconnaît des passages qu'il appelle des gués, des cols ou des isthmes. Le marin a besoin, pour se diriger, de savoir le tracé des côtes en plan et en relief. L'étude de la physionomie terrestre, à laquelle nous venons de consacrer un paragraphe, est donc une science très ancienne. Mais on a été longtemps à concevoir que cette géographie avait une histoire et avait subi une évolution, que les « paléogéographies » des âges antérieurs avaient été totalement différentes de la morphologie actuelle.

Et, d'ailleurs, cette idée d'évolution, que j'ai déjà énoncée et même discutée, est-elle bien vulgarisée ? Ne soulève-t-elle pas, outre quelques contradictions raisonnées, le préjugé de notre accoutumance au présent, celui de notre inertie ? Combien de personnes restent portées à croire que les montagnes, les mers, les sinuosités des côtes sont des traits permanents de notre planète ? Là encore il a fallu un effort d'esprit difficile pour se soustraire aux apparences. Tout au plus a-t-on reconnu de bonne heure, dès que les observations se sont un peu prolongées, que les fleuves pouvaient changer de lit, que leurs apports pouvaient combler des baies, former des deltas, tels que celui du Pô et du Nil, déplacer ainsi légèrement les côtes. Dans les régions volcaniques, on a pu voir aussi, voir de ses yeux, des îles apparaître et disparaître, suscitées par Pluton, englouties par la colère de Neptune. Mais comment oser étendre une

conclusion analogue aux montagnes, cette ossature solide, cette carcasse inébranlable, cette armature primitive, sur laquelle ont dû s'appliquer ensuite et se modeler les apports des eaux ? Comment imaginer que d'immenses mers, une Méditerranée, une Atlantique, n'aient pas toujours existé ? Comment se soustraire à l'actualisme ?

On s'est pourtant aperçu au début du XIX^e siècle — et ce fut la gloire d'un Élie de Beaumont — que les montagnes avaient un âge. Après quoi, on a trouvé les ruines d'autres montagnes disparues sous nos plaines ; on a constaté, dans les montagnes et dans les plaines, des déplacements horizontaux plus ou moins anciens qui avaient dû entraîner d'immenses compartiments de terrain, des pays entiers, sur des distances de cent ou deux cents kilomètres. On a mesuré des déplacements verticaux ayant l'allure d'effondrements, qui avaient produit des dénivellations de plusieurs kilomètres. On a constaté que des continents aujourd'hui disjoints avaient été longtemps réunis. Plus nous allons, plus ces données de l'observation se précisent et se généralisent. Et il ne s'agit pas seulement d'un dessin terrestre arrêté une fois pour toutes dans une phase cosmique, et légèrement retouché, sur l'origine duquel nous ne pourrions raisonner que par de vagues inductions, mais d'un dessin constamment repris et recommencé alors qu'il existait depuis longtemps des êtres vivants sur la Terre. Aussi, comme nous l'avons annoncé, le premier effort des géologues consiste à retrouver l'histoire des montagnes et des mers, comme un archéologue reconstitue, d'après le résultat de ses fouilles, la forme et l'usage d'un monument détruit.

L'idée fondamentale à laquelle il faut s'accoutumer quand on aborde la géologie est, je le répète, que montagnes et mers, tout au moins la plupart des mers, ont constamment

changé de place au cours des temps. L'histoire humaine n'accuse pas une transformation plus profonde, plus complète dans la succession des civilisations et des races ; celle des individus ne montre pas avec plus de précision leur naissance, leur épanouissement et leur mort. Modifions simplement l'allure de nos chronomètres comme fait un opérateur de cinéma pour donner une impression de rapidité, comptons par millions d'années au lieu de millénaires ou d'années ; nous verrons naître et mourir des montagnes, comme, avec une marche plus rapide encore, nous assisterions à la consommation d'un soleil, ou, avec une échelle chronométrique inverse, à la vie démesurément grandie de ces infiniment petits qui s'éteignent au bout de quelques secondes ¹.

Quand on envisage la géologie d'un point de vue pratique, on constate que ces passages momentanés des mers ont laissé, sur nos continents et dans nos montagnes actuelles, des couches marines, des strates, qui se sont superposées tranquillement les unes aux autres et que nos sondages recoupent, par conséquent, à des profondeurs d'autant plus grandes qu'elles sont plus anciennes. On observe également qu'après de telles périodes de calme, il s'est produit des phases accidentées, des surrections montagneuses, dont la traduction empirique est une interruption dans la série des strates et le redressement, le plissement des couches les plus vieilles. Pour le moment, n'envisageons ces mêmes faits que comme l'indice de cette évolution toujours continuée, tantôt par déplacements lents, tantôt par à coups, qui constitue l'histoire de la Terre ! Cet indice, l'examen d'une zone très superficielle, à laquelle se bornent nos investigations directes, nos tunnels ou nos mines, suffira pour nous le

1. Voir L. DE LAUNAY, *La Vie des montagnes*. (Fayard, 1924).

révéler ; mais nous aurons dû auparavant avoir appris à le voir, et c'est ce qui constitue l'apprentissage d'un géologue.

III. LES FONDEMENTS ACTUALISTES DE LA GÉOLOGIE

Notre but est de reconstituer la physionomie de la Terre aux diverses époques successives de son histoire. On peut prévoir qu'à toutes les époques, cette physionomie a comporté, comme elle le fait actuellement, des continents et des mers, des montagnes et des plaines, des rivières et des lacs, des déserts, des volcans, etc. Notre ambition serait donc de tracer des cartes anciennes, où tout cela serait représenté : des cartes mentionnant en particulier le relief des continents et des mers, la place des rivages, le sens des courants, la température des eaux. De ces cartes successives qui appartiennent à la géologie, la dernière, qui figure l'état actuel de la Terre, est réservée à la géographie physique, mais représente en somme la géologie de l'époque contemporaine. Comment sommes-nous armés pour résoudre ce problème difficile ? Nous allons nous en rendre compte en examinant les traces que cette dernière période contemporaine laissera derrière elle pour l'instruction possible des géologues futurs : de géologues venant travailler sur la Terre dans quelques millions d'années, pendant une phase géologique ultérieure, indépendamment de tous souvenirs humains et de toutes annales.

Ces géologues posthumes seraient un peu dans la situation des archéologues qui veulent retrouver l'histoire humaine d'après les produits de leurs fouilles. Tantôt une chance heureuse leur apporte des sépultures de Pharaons, des Mycènes ou des Tyrinthe, des Pompéi ; tantôt ils ren-

contrent seulement des restes énigmatiques sans lien avec le reste de l'histoire comme les alignements de Carnac, les antiquités mexicaines ou les statues de l'île de Pâques ; tantôt enfin, ils se trouvent en face de savanes ou d'étendues marines, sur lesquelles les hommes nomades ont pu passer et repasser jadis sans laisser trace de leur passage. Ils édifient alors toute leur histoire sur ce qu'ils connaissent des peuples sédentaires et constructeurs, fixés au sol par l'agriculture ou le commerce et ne disent rien des nomades pasteurs, si ce n'est qu'ils ont probablement existé. Pour le géologue, une époque ancienne ne survit que dans la mesure où elle a laissé des dépôts matériels et elle n'est datée que si ces dépôts ont, par une chance exceptionnelle, conservé des restes organisés.

Or, pour qu'un dépôt de cette époque finie subsiste, il faut : d'abord qu'il se soit formé, ensuite qu'il ait échappé aux chances de destruction ; chances d'autant plus probables qu'il était plus mince et placé dans une situation plus hasardeuse. Pour qu'un reste organisé persiste, il faut qu'il se soit trouvé immédiatement moulé, embaumé, fossilisé, soustrait aux animaux carnivores et préservé de la désagrégation. La conséquence immédiate est que nous sommes très inégalement renseignés sur les diverses régions dans le même temps et sur les diverses périodes dans la même région ; nous commettons à ce propos des fautes de proportion inévitables. Il a existé des multitudes de villes plus importantes que Pompéï dont il ne reste à peu près rien. Celle-ci, par les conditions dans lesquelles les cendres du Vésuve l'ont enfouie, a pris pour nous une importance tout à fait injustifiée. De même comparons ce que produit l'actualisme géologique sur nos continents, avec les traces qu'il laissera sous une mer ! Sur un continent, la phase

actuelle est uniquement marquée par quelques produits d'altération généralement limités à une vingtaine de mètres au plus, par un peu de terre végétale, par des éboulis. Même les parties dures des organismes, les squelettes osseux y sont rares. Les animaux sauvages qui meurent dans les bois n'y laissent que de rares débris bien vite éliminés. Le peu qui se forme ainsi est si mince, si localisé, si mal repéré que, dans un phénomène ultérieur, il a toutes les chances de disparaître.

En résumé, l'existence d'un continent ancien n'a généralement laissé aucune trace. Nous ne connaissons les continents que par les rivages marins dont l'empreinte s'est perpétuée autour d'eux, par quelques dépôts de lacs ou de rivières. Nous sommes conduits à les restreindre ou à les oublier.

On peut presque en dire autant des lacs et des rivières, qui occupent toujours une faible étendue avec une profondeur restreinte. Les dépôts lacustres ont pu se conserver et leurs organismes les définissent ; mais ils ont subi ensuite des chances de destruction telles que, lorsqu'on remonte au delà de l'époque secondaire, on en rencontre rarement des indices un peu importants, comme ceux du carbonifère. Dans les mers, au contraire, les dépôts sont abondants et continus. Ils se recouvrent les uns les autres et se préservent ainsi tant que la mer subsiste. Leur épaisseur peut devenir telle que, si le fond de la mer vient à émerger, leur base tout au moins se conserve.

Ainsi, par la force des choses, notre histoire des géographies terrestres se trouve à peu près limitée à l'étude des mers et ne connaît guère les continents que par élimination. D'où cette conclusion d'apparence logique, mais tout au moins indémontrée par cette voie, que les mers auraient occupé plus de place dans le passé et que la vie aurait été

autrefois exclusivement marine. D'autres motifs nous portent à croire que la vie s'est d'abord développée dans les mers. Mais l'inverse aurait eu lieu et les animaux auraient abondé sur les continents, dès le début de l'époque primaire, que nous n'en saurions probablement rien.

Pour les mers elles-mêmes, il faut distinguer, comme nous le ferons plus en détail dans le chapitre suivant, les apports, dits terrigènes, empruntés à la destruction des rivages ou aux apports des fleuves, qui sont très développés et très caractéristiques le long des côtes. Nous aurons d'autant plus d'occasion de les rencontrer en géologie qu'étant recouverts par une faible épaisseur d'eau, un mouvement moindre de soulèvement a pu suffire pour les faire émerger. Les sédiments littoraux, pour cette double raison, tiennent une place excessive dans nos observations. Leur facilité de reconnaissance et l'enseignement utile qu'ils apportent sur la distribution des continents attirent en outre l'attention sur eux.

Puis viennent les dépôts des mers profondes, jusqu'à 2.000 ou 3.000 mètres, dans lesquels la part des éléments terrigènes se restreint d'abord : en sorte qu'ils sont presque exclusivement composés par une vase organisée, due à une pluie incessante d'organismes infiniment petits, de globigérines, de ptéropodes, de radiolaires, de diatomées, formant un calcaire souvent crayeux. Après quoi, dans les très grandes profondeurs, atteignant 8 et 10 kilomètres, le rôle des organismes paraît à son tour se réduire et l'on n'a plus guère, ce semble, que des produits d'altération chimique assez minces formés avec une lenteur extrême et ressemblant parfois bien singulièrement à ceux qui s'effectuent sur un continent à l'air libre, argiles rouges, noyaux

manganésifères, etc. Les calcaires, qui tiennent une si grande place dans nos terrains et qui y constituent souvent des masses épaisses de plusieurs centaines de mètres, y représentent des dépôts de mers, relativement profondes. Leur abondance est remarquable, étant donné le relèvement de 1 ou 2 kilomètres qu'a exigé leur émerision.

Quant aux formations très profondes, les chances pour qu'on en rencontre dans nos séries de dépôts sont faibles, parce qu'il y a évidemment beaucoup moins de raisons pour qu'un dépôt soit porté d'une profondeur de 8 ou 10.000 mètres au-dessus de la superficie que pour qu'un dépôt littoral émerge par une dénivellation de quelques mètres. Quand il en existe, nous pouvons très bien ne pas les reconnaître, transformés qu'ils ont été par la diagénèse et le métamorphisme, dans un mouvement de l'écorce qui, par son amplitude même, a dû atteindre ici son paroxysme. Étant très minces, ils ont pu également être délavés et emportés au moment de leur violente émerision. J'observe, enfin, que l'on est très mal renseigné sur la profondeur à laquelle se sont formées les craies anciennes : profondeur autrefois supposée d'environ 5.000 mètres, par comparaison avec les craies actuelles, récemment remontée jusqu'à 1.000 mètres ¹.

Indépendamment de tels *sédiments*, nous voyons aujourd'hui cristalliser au jour quelques laves et nous reconnaissons aisément que ces laves superficielles doivent être accompagnées par la consolidation profonde de noyaux rocheux plus étendus. Nous pouvons donc nous attendre à ce que les roches cristallines tiennent une certaine place dans la géologie superficielle. Cette place est restreinte, comme le montre aussitôt l'examen d'une carte géologique un peu étendue, celle de la France, ou surtout celle de

1. Où en est la Géologie ? p. 6.

l'Europe. Toutes les observations nous prouvent et la logique nous montre aussitôt que cette proportion des roches ignées doit augmenter en profondeur, les sédiments marins n'ayant jamais pu être qu'assez superficiels, et qu'à quelques kilomètres au-dessous de la surface on ne rencontrerait plus que des granites ou roches analogues. C'est une question que nous remettrons au chapitre IV où nous étudierons l'intérieur de la Terre.

L'examen minéralogique des roches et des sédiments prend habituellement le nom de *pétrographie*. L'étude des sédiments comprend, d'autre part, deux sujets distincts : la détermination de leur succession tranquille au fond des bassins marins, lacustres ou fluviatiles que l'on appelle *stratigraphie*, et l'observation des mouvements ultérieurement subis par ces mêmes dépôts, qui constitue la *tectonique* ou *orogénie*.

La stratigraphie s'appuie à son tour sur un examen pétrographique des dépôts et sur l'exploration *paléontologique* des organismes vivants qui s'y sont trouvés conservés. La tectonique embrasse, comme science connexe, l'examen des rapports entre la superficie et la profondeur : notamment les recherches sur la cristallisation des *roches ignées*, sur les modifications profondes subies par les terrains stratifiés dans le *métamorphisme*, sur les déplacements lents du niveau marin, sur les mouvements *sismiques* du sol et sur le *volcanisme*.

La stratigraphie représente, pour la géologie, ce qu'est la statique en mécanique, et la tectonique est sa dynamique. Comme en mécanique, on commence par les phénomènes les plus simples d'équilibre et de repos. Après quoi, on observe que cet équilibre n'est jamais réalisé, que ce repos n'est jamais complet ; on aborde l'étude des mouvements et,

pour simplifier, on les ramène à une succession plus ou moins rapide d'états statiques. Ce qui correspond à établir, dans l'histoire terrestre, des coupures artificielles, que l'on tâche, autant que possible de faire correspondre avec des discontinuités présentant une certaine généralité. La stratigraphie repose en grande partie sur des faits qui se reproduisent aujourd'hui. La tectonique n'est qu'une induction et une coordination de faits qui échappent, par leur ampleur ou par leur origine profonde, à nos observations directes.

BIBLIOGRAPHIE

1894. MURRAY et RENARD. *Carte des sédiments de mer profonde.* (Bruxelles.)
1904. NANSEN. *The norvejian North-Polar Expedition.*
1904. THOULET. *L'Océan, ses lois et ses problèmes.*
1907. DE LAPPARENT. *Traité de géographie physique.* (Masson.)
1909. DE MARTONNE. *Traité de géographie physique.* (Armand Colin.)

CHAPITRE III

L'ACTIVITÉ GÉOLOGIQUE SUPERFICIELLE. L'ÉROSION ET LA SÉDIMENTATION.

Les modifications produites sur la surface de la Terre par l'activité interne sont parfois violentes et prennent l'allure de cataclysmes qui attirent l'attention, mais qui sont en somme très localisés. Elles s'accompagnent de déplacements lents et plus généraux, insuffisamment étudiés, difficilement perceptibles. Le résultat, dans l'un et l'autre cas, se rattache à la tectonique et sera plus utilement envisagé quand nous aurons étudié l'intérieur de la Terre. Au contraire, nous voyons constamment, et de tous côtés, agir à la superficie les deux grandes forces nivelantes qui produisent les effets étudiés en stratigraphie : l'érosion et la sédimentation, auxquelles nous allons consacrer ce chapitre.

En principe, on peut dire que toutes deux, par des procédés divers, l'une par ablation, l'autre par apport, ont pour effet de niveler la superficie terrestre et de lui imposer son profil d'équilibre. Si elles étaient seules en jeu, il ne s'écoulerait pas un temps très long avant que la surface des continents et le fond des mers fussent ramenés sur un même niveau, recouvert par une même épaisseur d'eau. Mais l'activité interne rétablit de temps en temps des saillies et des fosses nouvelles, sur lesquelles s'acharne alors une fois de

plus le travail patient des érosions et des sédimentations. Les forces nivelantes travaillent avec plus de continuité et toujours dans le même sens, sauf à avoir pu par moments accélérer leur action. Le travail des forces internes se poursuit peut-être lui aussi d'une manière continue à notre insu ; mais il se manifeste seulement à nous dans quelques périodes de crise. Alors, il donne lieu, tantôt à des saillies, tantôt à des affaissements.

On peut se demander si les crises de ces deux forces contradictoires sont soumises à une loi de périodicité qui pourrait avoir une origine cosmique, ou, comme il paraît plus probable au moins pour les forces internes, si elles correspondent à une rupture accidentelle, après une tension prolongée.

En tous cas, les manifestations internes, dont l'orogénie exprime la synthèse, ont leur contrecoup manifeste sur l'activité des forces nivelantes et il semble qu'à chaque phase des premières corresponde, pour les secondes, la répétition d'un nouveau cycle.

I. L'ÉROSION¹

Il est logique de commencer par l'érosion, puisque c'est elle qui, pour la plus grande part, soit par voie de transport mécanique, soit par dissolution chimique, fournit les éléments nécessaires à la sédimentation. Quand on étudie l'activité vitale qui, nous allons le voir, contribue si fort aux actions sédimentaires, on retrouve un autre effet indirect de l'érosion comme servant à nourrir les organismes, à leur fournir les éléments chimiques, tels que la chaux, les

1. Voir *la Science Géologique*, p. 335, et *la Vie des montagnes*, 3^e partie.

alcalis, le manganèse, les métaux, etc., réintroduits ainsi, sous une autre forme, dans de nouveaux terrains. Ici, nous nous bornons à examiner le mécanisme et les premiers résultats matériels du phénomène.

L'érosion est un produit de l'attraction universelle facilitée par la circulation des eaux. Tout élément pondérable tend vers le centre de la Terre chaque fois qu'il rencontre un vide au-dessous de lui. Comme on le disait au moyen-âge, le « lieu naturel » de cet élément est au centre de la Terre. Quand le même corps pesant est sur une pente, sa chute, ralentie ici par les frottements, n'est arrêtée que lorsque ces frottements deviennent supérieurs à la composante de la pesanteur suivant leur plan. L'intervention de l'eau a pour premier effet de fournir un lubrifiant qui diminue ces frottements et facilite les chutes. Non seulement l'eau liquide, mais la glace, dans son cheminement, entraîne des roches. L'eau exerce, en outre, des effets de destruction mécanique. Tantôt l'effort est, en quelque sorte statique. L'eau, introduite par porosité dans les terrains, les brise en se congelant. Tantôt il y a choc dynamique dans les cascades, les torrents, les vagues. Sous cette forme, d'autres forces naturelles, comme les vents, peuvent s'associer au travail de l'eau ; parfois avec un effet très momentané de remontée. Dans tous les cas, les roches morcelées, émiettées, usées, sont réduites en fragments de plus en plus petits et de plus en plus meubles, qui, par étapes successives, vont être entraînés vers des bas-fonds de plus en plus bas et, finalement, après avoir comblé les lacs ou les ravins, aboutiront en partie à la mer. Enfin, comme agent dissolvant, l'eau travaille dans le même sens et avec une intensité presque égale.

Tout cela est très connu. Mais on ne se rend généralement

pas compte de l'énorme puissance que peuvent développer les érosions en se prolongeant. Si nous parcourons les montagnes, nous y voyons bien de grandes pentes d'éboulis, des pierrailles qui fatiguent les ascensionnistes. Parfois, en escaladant une cheminée de rochers, nous avons à nous garer contre la chute d'un bloc. Ou nous apercevons, sur la neige, les cailloux semés par une avalanche. Dans le torrent, l'eau roule devant nous des cailloux qu'elle arrondit. De temps en temps, un éboulement sensationnel, qui ruine quelque village, fait tomber un quartier de falaise et, quand cette falaise borde le rivage, les quartiers de rochers effondrés se réduisent vite en sable. Mais, en somme, les résultats de cet effort naturel nous semblent petits parce que la vie de l'homme est courte. Si nous revenons, après quelques dizaines d'années, voir la même cime alpestre, il nous semble qu'elle est intacte ; et des mesures géodésiques, dont la précision relative est récente, n'accusent pas une réduction de hauteur appréciable dans la Meige ou dans le Cervin. Aux yeux du vulgaire, les montagnes semblent, du haut de leur indestructibilité, railler la fragilité de l'homme.

L'impression est bien différente pour un géologue, habitué à prendre comme unités de temps des millénaires ou des dizaines de millénaires et à regarder la Terre d'assez loin pour l'embrasser dans son ensemble. Le géologue, qui a des moyens d'apprécier l'âge des montagnes, constate aussitôt combien les plus anciennes prennent peu à peu un aspect usé, fatigué, émoussé, arrondi. Il lui suffit de comparer, avec les Alpes si récentes, les Pyrénées, les Vosges, et l'Ardenne, de plus en plus vieilles. Bien d'autres constatations viennent confirmer cette idée d'usure appliquée aux montagnes et aux saillies terrestres. C'est l'apparition au jour, sur de vastes étendues, de roches granitiques ou gneissiques

que leur structure indique cristallisées en profondeur sous un couvercle de terrains disparus. Ce sont les plissements profonds des couches, analogues à ceux des Alpes, que nos mines constatent dans une région complètement aplanie à la surface, etc., etc. Nous sommes amenés ainsi à multiplier ce travail lent et persévérant des forces érosives et corrosives par un nombre de siècles qui les transforme en des coups de rabot puissants ?

Sans y mettre aucune imagination, on possède, du reste, des moyens approximatifs de calculer les quantités de matériaux apportées chaque année à la mer ou dans certains lacs, en suspension ou en dissolution, dans une période aussi tranquille que la nôtre ; et on conçoit aisément que ces effets aient pu s'exagérer dans les phases de crise. La comparaison de nos toutes petites rivières actuelles avec les énormes lits d'alluvions anciennes, au milieu desquelles elles serpentent misérablement, suffit à montrer l'importance de ce facteur grossissant et à faire considérer tous les chiffres actuels que nous allons reproduire comme de très faibles minima. Par exemple, une déviation d'une modeste rivière alpestre, la Kander, opérée en 1712, a eu pour résultat, dans les trois premières années, un apport de 10 millions de mètres cubes. Ce travail des eaux, qui se continue là à raison de 300.000 mètres cubes par an, a déjà approfondi le lit de 45 mètres en deux siècles. Le Danube, en temps de crue, contient $1/2460$ de matières terreuses en suspension, le Mississipi jusqu'à $1/1500$ et le Gange $1/428$. Le Delta du Nil représente évidemment un estuaire comblé, dans lequel, à Memphis, on a constaté environ 10 mètres d'alluvions limoneuses. Le Rhône apporte chaque année, dans la Méditerranée, 21 millions de mètres cubes de troubles et le Danube 60 millions. Pour le Pô, le chiffre s'élève

parfois à 100 millions. En admettant, pour tous les fleuves du globe, un débit annuel de 28.000 kilomètres cubes, on a estimé l'apport solide annuel à 10 kilomètres cubes : ce qui amènerait la disparition de la saillie continentale, par cette seule voie mécanique, au maximum en 7 millions d'années. En ajoutant 5 kilomètres cubes de substances en dissolution et tenant compte de diverses circonstances accessoires, on réduit aisément ce chiffre à 3 millions d'années.

Mais cela ne correspond, je le rappelle, qu'à la période actuelle, où la plupart de nos cours d'eau commencent, par l'effet même de l'érosion, à atteindre un profil d'équilibre qui, peu à peu, va réduire de plus en plus la puissance du phénomène (si aucun mouvement d'origine interne n'intervient) ; antérieurement, cet effort destructif a dû atteindre des chiffres beaucoup plus considérables.

Dans le même ordre d'idées mécanique, on a constaté que l'érosion du Niagara, en 25 ans, fait reculer la cascade du Fer à Cheval de 1 m. 50. En 3.000 ans, le mouvement ainsi continué amènerait le tarissement du Niagara : toutes les eaux qui l'alimentent aujourd'hui devant s'écouler au sud vers le Golfe du Mexique. Sur les rivages marins, on a mesuré une ablation annuelle qui atteint au moins 3 mètres de largeur par siècle sur l'ensemble des côtes anglaises. Certaines îles sont rongées par la mer à raison de 1 mètre et plus par an. La mer n'exerce pas seulement son action en plan horizontal, sur la côte ; mais les courants peuvent entretenir des passes atteignant 70 et 100 mètres de profondeur. Les profondeurs marines semblent aujourd'hui exemptes de courants semblables et la destruction s'y réduit par suite à une corrosion d'origine chimique. Mais il a pu en être tout différemment dans les périodes anciennes.

Je viens de faire une allusion à la corrosion chimique

Tout ce qu'il y a de soluble dans les roches tend progressivement à se dissoudre et, en ce qui concerne cette solubilité, le géologue a encore un étalon de mesure qui lui est particulier. Il constate, en effet, sans cesse, le déplacement et la recristallisation après dissolution de substances que, dans les laboratoires, où l'on opère vite, on envisage pratiquement comme insolubles. Pour un géologue, la dissolution de la silice, du sulfate de baryte, du sulfure de plomb, de l'or natif, etc., se réalise sans cesse, et cela de nos jours, dans des conditions superficielles, simplement par l'action très prolongée d'une eau qui renferme, comme c'est le cas constant, de très petites quantités d'acide carbonique ou de matières salines. Il est vrai que de telles substances, difficilement dissoutes, se reprécipitent aisément ; mais, par étapes successives, elles n'en subissent pas moins la destinée commune qui est de descendre progressivement et d'appauvrir ainsi les continents. Les mers constituent l'égout universel, où arrivent tôt ou tard tous les éléments solubles, qui auraient pour effet d'accroître sans cesse la teneur en sels minéraux, si les mouvements tectoniques, entraînant des déplacements des mers, ne venaient parfois restituer aux continents un grand bloc de terrains formés par précipitation dans les fonds marins.

A la surface des continents, cette corrosion chimique se traduit par la désagrégation des roches solides : les calcaires qui se réduisent à un résidu argileux ; les granites dont le liant feldspathique est d'abord kaolinisé, puis emporté par le ruissellement, etc. La corrosion prépare ainsi l'érosion, dont les effets se superposent à elle.

Le résultat de toute cette destruction progressive n'est pas seulement, comme nous allons le dire, de préparer la sédimentation. Il est aussi de mettre au jour, sur les conti-

nents, des parties de l'écorce, auparavant dissimulées dans la profondeur. L'érosion est l'ouvrier qui travaille pour le géologue, comme une équipe de piocheurs et de pelleteurs pour l'archéologue. Elle nous découvre ce qui s'est passé autrefois dans l'épaisseur du globe et, bien que ses effets soient nécessairement limités aux quelques kilomètres d'écorce superficielle déplacés par les plissements ou les failles et ramenés ainsi au-dessus de la mer, elle nous fournit un enseignement précieux sur cet intérieur de la Terre que nous connaissons si mal et dont nous aurons à nous occuper plus tard.

II. SÉDIMENTATION. LES ENSEIGNEMENTS DE L'OCÉANOGRAPHIE SUR LA RÉPARTITION DES SÉDIMENTS

L'érosion a, par elle-même, un effet nivelant ; mais, en outre, elle fournit des matériaux à la sédimentation, qui les utilise pour un résultat pareil. L'une des forces en détruisant, l'autre en construisant tendent au même but : placer les matériaux meubles dans une situation d'équilibre où ils puissent résister ensuite à l'attraction centrale. Nous avons vu que les fleuves apportent à la Terre chaque année 10 kilomètres cubes en suspension et 5 kilomètres cubes en dissolution. Or, l'écorce terrestre comprend, en chiffres ronds, 60 % de silice, 15 d'alumine, 6 de fer, 5 de chaux, 5 d'alcalis, etc.¹. Les alcalis, la chaux et la magnésie, à l'état de chlorures, sulfates, nitrates, etc., prédominent dans les dissolutions. La silice et l'alumine s'y ajoutent dans les matières clastiques. Ce sont les éléments principaux que nous allons voir se classer.

1. Voir *la Science Géologique*, p. 654.

La sédimentation opère alors par deux voies : mécanique, sur les matières entraînées : chimiquement et organiquement, sur les matières dissoutes. Le premier phénomène est localisé dans l'intérieur des continents ou sur leur bordure. Le second, qui commence à se manifester dans les lacs, atteint une importance prépondérante dans les mers. En deux mots, la précipitation mécanique produira les sédiments dits terrigènes, tels que les argiles, schistes, sables, grès, poudingues, etc. (suivant la grosseur des grains). Les effets chimiques et organiques se concentreront essentiellement sur la production des calcaires et des phosphates de chaux ou minerais de fer connexes, qui sont généralement des cimetières d'être organisés.

Les sédiments étant, en grande majorité, comme nous l'avons vu, d'origine marine, pour analyser les conditions de leur formation nous n'aurons qu'à étudier ici ce qui se passe aujourd'hui dans la mer. Il faudra seulement, cela va de soi, ne pas fonder des assimilations de faunes sur des ressemblances insuffisantes et ne pas oublier que l'évolution des êtres vivants en fonction de leur milieu a pu les habituer progressivement à des conditions de vie nouvelle dans une proportion qu'il nous est difficile d'apprécier.

L'océanographie, c'est la géologie de l'avenir, comme la stratigraphie est, avant tout, l'océanographie du passé.

Dans le fond des mers, côte à côte avec le travail continu des forces naturelles, de la gravité, des précipitations chimiques et des dissolutions, des milliards d'animalcules vivent et meurent, d'innombrables générations se succèdent et évoluent pour accumuler finalement les dépôts inertes qui, dans des millénaires ultérieurs, deviendront les terrains sédimentaires d'une terre nouvelle, comme aujourd'hui, en Touraine, en Normandie, en Champagne, les calcaires

crayeux, sur lesquels croissent nos moissons et dont nous extrayons les matériaux de construction de nos maisons, sont le produit des bryozoaires, des foraminifères de l'époque crétacée. Ce sont des sédiments comparables à ceux des terrains géologiques, qui se forment dans nos mers, pareils à ces décors que l'on prépare dans les dessous mystérieux d'une scène de théâtre et qui doivent, au moment voulu, en surgir pour un changement à vue. Sur la préparation de ces grands changements, auxquels nous n'assisterons pas, mais dont l'équivalent ancien constitue notre histoire géologique, l'océanographie nous renseigne. Les explorations entreprises avec tant de succès depuis quelques années dans le fond des Océans nous montrent de semblables terrains en voie de dépôt, et nous font, dans une certaine mesure, assister à une première étape, à l'étape sous-marine de ces sédiments, dont les équivalents anciens ont eu ailleurs, dans la suite, une histoire, tantôt terrestre, tantôt de nouveau marine ou lacustre, si compliquée, si muable, avec des vicissitudes si diverses et une si changeante fortune.

Que se passe-t-il actuellement dans le fond des mers ; j'entends : que s'y passe-t-il dans l'ordre d'idées très spécial de la géologie ? Le premier point qui nous intéresse est qu'il s'y dépose des sédiments et que la nature de ces sédiments diffère suivant la profondeur des eaux, l'éloignement des continents, le sens des courants, la température des eaux superficielles, etc. : ce qui nous permettra ensuite, abordant nos terrains géologiques, de reconnaître dans quelles conditions des sédiments analogues se sont déposés autrefois. Donnons rapidement quelques détails à ce sujet pour montrer comment la paléogéographie arrive à reconstituer le régime des anciennes mers !

Dans la formation des sédiments marins, une première

grande démarcation doit être établie. Les uns, composés de débris clastiques, sont le produit de la destruction mécanique des continents ; nous les avons appelés plus haut terrigènes. Les autres ont commencé par être en dissolution, tout en ayant primitivement une origine analogue, et ils sortent de ces dissolutions, soit par l'intermédiaire des organismes, soit par une simple réaction chimique. Enfin, d'autres réactions chimiques, qualifiées de diagénèse, se continuent sur les sédiments après leur dépôt.

Les *sédiments terrigènes* proprement dits forment une couronne autour des continents et cessent lorsqu'on s'éloigne assez de ceux-ci, pour faire place à des sédiments tout différents, ou d'origine organique et ayant l'apparence des vases grisâtres, que nous allons tout à l'heure apprendre à distinguer, ou d'origine chimique et pouvant prendre l'allure des argiles rouges. Cette distinction des dépôts terrigènes est très importante. Il ne faudrait pourtant pas lui attribuer, comme on le fait parfois, une valeur trop absolue. A proprement parler, il n'existe guère de sédiments qui ne renferment des éléments terrigènes. Seulement, à distance des côtes, ceux-ci se réduisent généralement à des particules très fines, qui demeurent beaucoup plus longtemps en suspension qu'on ne le croit généralement et qui contribuent probablement à fournir l'argile des vases profondes, en même temps que cette argile, redissoute comme nous allons le voir, donne la silice des organismes siliceux et prépare par suite la formation des silex dans les terrains. Lorsqu'au lieu de se borner à un énoncé sommaire, on examine certaines coupes de carottes rapportées par des sondages très profonds, on y constate même assez souvent des intercalations anormales de véritables lits sableux extrêmement fins ¹,

1. Expédition du *Gauss* et travaux de THOULET.

qui montrent un entraînement de ces particules par les eaux jusqu'à des distances très considérables.

Ces matériaux détritiques subissent une préparation mécanique qui est particulièrement visible sur nos rivages et qui contribue à la formation des terrains littoraux si abondants dans nos étages géologiques : vases argileuses dans les estuaires calmes, sables sur les plages, galets au pied des falaises contenant des roches dures battues par les vagues.

Plus loin de la côte, on divise les boues terrigènes : en boues bleues chargées de sulfure de fer et imbibées de sels ammoniacaux ; en boues rouges où le fer s'est peroxydé ; en boues vertes où le fer est à l'état de silicate (glauconie), ces dernières le long des côtes escarpées. Les faits en question sont suffisamment connus pour qu'il suffise d'en rappeler la nature et, pour la même raison, je me bornerai également à de brèves notions sur la répartition des organismes dans les dépôts marins,

On sait que les fonds marins comprennent une première grande division que l'on appelle le *plateau continental*, plateau terminé par la ligne de niveau de 200 mètres et caractérisé par la pénétration des rayons lumineux dans des conditions telles que les plantes peuvent y vivre, entraînant l'existence des animaux herbivores. Certaines mers, comme la mer du Nord ou la Manche, appartiennent totalement à ce plateau continental. On peut aisément y distinguer deux premières zones, *littorale* et *sublittorale*, qui sont soumises au jeu des marées et où les individus, d'espèces peu nombreuses, sont très abondants. La *zone littorale* a son sommet caractérisé par le niveau des Balanes ; puis, en s'approfondissant, on a les *Mytilus*, les *Littorines*, les *Patelles* ; et enfin, dans la zone seulement découverte aux basses mers d'équinoxe, les *Haliotis* et les *Pecten*.

Après quoi vient encore, du niveau de la basse mer jusqu'à environ 27 mètres, la zone des *Laminaires*, avec les bancs d'huîtres, les seiches et les calmars. Notons incidemment qu'à ce niveau, les algues contribuent à fixer et à isoler deux des éléments constitutants de l'eau de mer, l'iode et le brome, qu'on viendra ensuite en extraire !

Plus bas, de 27 à 92 mètres, nous avons une zone qui comprend les grandes régions de pêche fréquentées par la morue, la plie, le turbot, la sole.

Enfin, il faut encore rattacher au plateau continental, dans des conditions très spéciales, les *formations coralliennes* qui prennent une si grande part dans nos terrains géologiques.

A l'occasion des coraux, la notion la plus importante à retenir pour nous est que les organismes coralligènes vivent uniquement dans une eau très pure, là où la température de surface ne descend pas au-dessous de 20° et où la variation ne dépasse pas 6°, enfin à une profondeur, qui, d'après les mesures récentes, ne dépasse pas 64 mètres pour les coraux proprement dits et 120 mètres pour les algues calcaires du groupe des nullipores. Ce sont là des restrictions très nettes, en raison desquelles les récifs coralliens occupent aujourd'hui une zone très localisée dans le voisinage de l'équateur ; et le fait que, dans des périodes géologiques plus anciennes, les coraux se sont étendus jusque dans les régions polaires, a une grande importance pour l'histoire des climats anciens.

Ces coraux donnent lieu à une autre observation curieuse. Darwin, après des observations trop rapides, avait édifié une théorie reprise par Dana, suivant laquelle la construction des récifs coralliens démontrait un affaissement progressif des régions correspondantes. D'après la théorie de

Murray, actuellement admise, les récifs coralliens jalonnent simplement des cônes volcaniques sous-marins, ou des cimes submergées comme il en existe en grand nombre dans le Pacifique. De tels cônes ont été reconnus par les océanographes. Le Nero en a signalé vingt sur le trajet d'un câble reliant le Japon aux Sandwich : l'un arrivant jusqu'à 150 mètres de la surface ; d'autres partant de 9 000 mètres de profondeur pour aboutir à 1.200 mètres au-dessous du niveau de la mer, etc. C'est sur ces cônes que s'accumulent d'abord les sédiments organisés (et cela depuis une époque géologique qui peut être fort ancienne), jusqu'au jour où les organismes coralligènes de profondeur, tels que les Lithothamnium, commencent à s'y établir et les rapprochent rapidement du jour, avec une vitesse telle que 1.000 ans suffiraient pour monter de 50 mètres. En fait, remarque assez paradoxale, les coraux ne jouent souvent qu'un rôle accessoire dans la construction des récifs dits coralliens, dont certains ne présentent guère que des algues calcaires. Puis interviennent les remaniements de ces éléments calcaires et les accumulations d'organismes divers qui viennent s'établir sur le récif.

Nous arrivons enfin aux *sédiments de mers plus profondes*. Ceux-ci sont surtout composés d'organismes qui les différencient en deux grandes catégories : dépôts calcaires à globigérines, ou à ptéropodes ; dépôts siliceux à radiolaires et à diatomées.

L'influence de la température sur la répartition de ces organismes est très nette. Dans les eaux chaudes, dominent les organismes calcaires ; dans les eaux froides, ne subsistent que les organismes siliceux. Voici comment les uns et les autres se procurent les éléments de leur substance.

Pour la chaux qui est en proportions assez sensibles dans

l'eau de mer, ce ne sont pas les traces de carbonate qui interviennent, mais les sulfates beaucoup plus développés. Ceux-ci sont transformés par le carbonate d'ammoniaque venant des organismes, et le carbonate de chaux est ensuite secrété. Comme la décomposition de la matière azotée est particulièrement rapide dans les eaux chaudes, ces réactions s'y précipitent. La sécrétion calcaire, abondante dans les régions à haute température uniforme, diminue dans les régions tempérées où son maximum a lieu en été et disparaît presque dans les zones polaires.

Ainsi les organismes calcaires, les *globigérines*, jouent un rôle tout à fait dominant. Presque tout le fond de la mer en contient au moins 10 % ; mais on réserve le nom de vase à globigérines pour le cas où la proportion dépasse 30 %. Ces vases à globigérines renferment un peu moins de 2 % d'organismes siliceux et une certaine proportion d'argile, qui tendra à s'accroître par la dissolution du calcaire dans la diagénèse. Finalement, la vase à globigérines devient alors une argile rouge.

Une carte des fonds marins accuse le rôle prédominant de ces vases à globigérines, excepté dans le Pacifique où les dernières explorations de l'*Albatros* en ont cependant trouvé des zones assez larges. On les trouve couramment vers 5.000 mètres de profondeur et l'on avait autrefois cru pouvoir en conclure que les craies géologiques, assimilées avec ces vases calcaires à globigérines, provenaient d'une profondeur pareille. D'après des observations de M. Cayeux, la craie ancienne contiendrait fort peu de véritables globigérines, mais surtout des foraminifères différents.

Plus localement, on trouve, jusqu'à une profondeur maxima de 3.000 mètres, des vases à *péropodes*, qui forment des taches sur la carte de l'Atlantique.

Passons maintenant aux vases siliceuses. Ici l'origine de la silice c'est l'argile, qui subsiste à l'état de fine suspension jusque dans les profondeurs extrêmes. On suppose que l'intermédiaire chimique est fourni par la matière organique en décomposition qui réduit les sulfates en sulfures alcalins ; après quoi, ceux-ci, à leur tour, agissent sur l'argile. Les expériences de Murray et Irvine ont montré que, pour faire vivre les diatomées dans une liqueur, il fallait leur fournir de l'argile pulvérisée.

Or, la quantité de matière argileuse qui reste en suspension est d'autant plus forte que la température de l'eau est plus basse. C'est sans doute une des causes pour lesquelles les diatomées siliceuses sont particulièrement abondantes dans les eaux froides. Mais ce phénomène est complexe et l'observation ne saurait être généralisée.

Les organismes siliceux se composent d'éponges, de diatomées et de radiolaires. Les derniers seuls arrivent à former, dans la mer, de véritables dépôts spéciaux. Les autres restent à l'état d'appoint dans les dépôts calcaires.

Les *éponges* ont une aire de dispersion très étendue, parce que leurs embryons nagent librement, et on retrouve leurs spicules dans les terrains les plus divers. Ils s'y dissolvent rapidement et contribuent à remettre de la silice en mouvement.

Les *diatomées*, algues siliceuses, vivent dans les eaux de faible salinité, telles que les estuaires. Il arrive d'en rencontrer au large, dans l'Atlantique, d'immenses bancs flottants ayant plusieurs kilomètres de long sur quelques mètres d'épaisseur. Elles se développent, comme les algues calcaires, dans les couches supérieures des eaux, où elles servent à nourrir de nombreux animaux marins. Après quoi, leurs débris tombent au fond. On en trouve une longue

traînée le long de l'Antarctide, une autre au sud du détroit de Behring. De plus, contrairement à ce qui était affirmé il y a quelques années, l'*Albatros* en a observé dans une région chaude par 12° de latitude sud sur la côte de l'Amérique du Sud.

Les *radiolaires* vivent surtout dans les eaux chaudes et relativement tranquilles. Leurs dépôts forment une traînée équatoriale à travers le Pacifique, du golfe du Mexique vers l'Australie, puis entre l'Australie et Java. Par endroits, les organismes siliceux arrivent, dans le Pacifique, à dominer dans la vase. Mais c'est surtout dans les mers antarctiques qu'ils entrent en moyenne pour une forte part, atteignant 16 %.

Nous venons d'indiquer la répartition de ces diverses vases. Voyons comment elles se forment et ce qu'elles deviennent.

Tout d'abord, on remarquera l'influence des courants superficiels qui, suivant leur température, développent plus ou moins la vie organisée, avec tel ou tel caractère. Le long des courants chauds, les organismes de la surface descendent dans la mer, en servant à nourrir d'autres êtres plus profonds qui tombent à leur tour. Sur les bords superficiels de ces courants, les variations de température produisent parfois des hécatombes. Finalement, il se fait, vers le fond, une chute lente de particules organiques, les unes calcaires, les autres siliceuses.

Ces particules subissent certainement, avant d'arriver au fond, une dissolution partielle et des réactions chimiques, d'autant plus accentuées qu'elles mettent plus longtemps à descendre. C'est le commencement des transformations que nous appelons la *diagénèse*¹. Une partie des différences

1. Voir sur cette question : *Où en est la Géologie ?* p. 14.

signalées plus haut entre les dépôts de diverses profondeurs en provient. Ainsi, 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 par disparaître à leur tour dans les grandes profondeurs. C'est pourquoi, dans le Pacifique, plus profond que l'Atlantique, on en rencontre si peu dans les grands fonds, quoiqu'elles soient aussi abondantes à la surface.

Une fois déposées sur le fond de la mer, les vases continuent à subir des transformations analogues, qui doivent progressivement donner une allure différente à des dépôts semblables suivant leur âge de formation plus ou moins ancien, ou, lorsque ces dépôts ont été ultérieurement ramenés au jour dans les étages géologiques, suivant la durée plus ou moins longue de leur séjour dans la mer.

Ces réactions ne sont pas encore bien connues. Chimiquement, il y aurait lieu d'étudier ce que peut produire, sur des vases de compositions diverses, de l'eau de mer à environ 2° de température qu'une pression considérable amène à y pénétrer.

En résumant les quelques observations que l'on a faites à ce sujet, l'on est frappé par la grande analogie que paraissent présenter ces phénomènes avec ceux qui caractérisent les altérations superficielles de nos terrains dans la zone de peroxydation, directement exposée au contact des eaux fortement aérées et chargées d'acide carbonique. Des conditions très différentes amènent au même résultat.

Le premier fait est, par exemple, l'élimination de la chaux, la décalcification. Nous remarquons déjà tout à l'heure que, plus le fond de la mer est loin, moins les coquilles calcaires y parviennent, si bien que nous allons trouver, dans

les grands fonds, de l'argile rouge manganésifère, analogue à celle que produisent la décalcification et la latéritisation de nos plateaux. L'expédition du *Gauss*, au centre de l'Atlantique, a ramené des carottes de sondage, dans lesquelles il y avait manifestement moins de chaux à la base qu'au sommet. On a cru à une modification dans les conditions de dépôt ; je croirais plutôt à une altération ultérieure. En même temps, toujours comme à la surface, la proportion de magnésie augmente parce que le carbonate double de magnésie et de chaux est moins soluble que le carbonate de chaux : il y a dolomitisation.

D'autre part, il se produit une concentration de la silice, et d'autres corps accessoires, tels que le fer, le manganèse, le phosphate de chaux, sur des centres d'attraction, exactement comme cela se produit sur nos affleurements. Il est bien probable que nombre de concentrations semblables, observées dans nos terrains géologiques, datent de l'époque où les sédiments en question se trouvaient encore sous la mer, bien que le phénomène se soit incontestablement continué et accentué après l'émersion. Parmi les phénomènes de dissolution, on peut remarquer encore que, sur les grands fonds marins, où les dents de squales et les caisses tympaniques de cétacés sont parfois assez abondantes, toutes les autres parties de leur squelette ont été dissoutes ; généralement tout ce qui était phosphate de chaux a été éliminé, les parties calcaires ayant un peu mieux résisté.

Une fois dissous, les éléments tendent à recristalliser. La calcite, par exemple, remplira tous les vides, notamment ceux laissés par la dissolution du squelette ou de la coquille, qui se trouve ainsi remplacée par un *test de substitution* à orientation cristallographique.

De même, dans la gaize, la silice provient des spicules de

spongiaires et s'est reprécipitée sous forme de silice globulaire, par exemple à l'intérieur des foraminifères, etc.

L'une des formations océanographiques les plus importantes qu'il faille rattacher à la diagénèse est celle des *argiles rouges* avec dépôts de manganèse.

L'argile rouge a été rencontrée pour la première fois par le *Challenger* à 5.000 mètres de profondeur, et Wyville Thomson l'envisage comme un résidu de la vase à globigérines. La théorie admise aujourd'hui est autre et, d'après Murray, on attribue d'ordinaire cette argile rouge à la décomposition des roches diverses, surtout des roches volcaniques qui forment le fond marin.

Peut-être y aurait-il lieu de reprendre, dans une certaine mesure, l'explication de Thomson et de dire que, dans les très grandes profondeurs, tout se transforme en argile rouge, parce que tout ce qui est calcaire se dissout avant d'y arriver. C'est ainsi qu'à la surface des continents, nous voyons des argiles rouges, à compositions légèrement diverses¹, avec plus ou moins de silice associée à l'alumine, se produire aussi bien sur les plateaux calcaires, dans les poches dites d'argile à silex, que sur les serpentines de la Nouvelle-Calédonie ou sur les plateaux anciens de Madagascar.

L'argile rouge des mers est essentiellement formée de silicate d'alumine rouge brique, avec une teinte brun chocolat, ou même noirâtre, due au développement plus ou moins accentué du manganèse.

Ce développement du *manganèse* en nodules souvent volumineux constitue un rapprochement de plus avec les formations superficielles, où j'ai montré combien il est caractéristique et abondant². Le manganèse des argiles

1. Voir *Gîtes métal*, t. I, p. 197, sur la latéritisation.

2. *Gîtes métal*, I, 200 et II, 530 à 536.

rouges, que l'on a trop exclusivement rattaché aux roches volcaniques, provient, en réalité, de toutes les roches érodées quelconques, dont les traces manganésifères les plus faibles interviennent dans le remarquable processus de sa concentration.

Le silicate d'alumine hydraté, qui est l'élément caractéristique de ces argiles rouges, est accompagné de zéolithes, de petits fragments de ponce ou de cristaux volcaniques (dans le Pacifique, avec des milliers de dents de squales, des os tympaniques de cétacés, etc.). Il serait intéressant de préciser les différences de teneurs que présentent ces diverses argiles et qui doivent tenir à leur origine. En moyenne, dans les analyses du *Challenger*, la teneur en fer était supérieure à celle de l'alumine. Il y a souvent une proportion de silice trop forte pour la composition théorique du silicate d'alumine : silice attribuable sans doute à la précipitation d'organismes siliceux, non encore transformés. De même, la proportion de carbonate de chaux reste parfois très élevée, jusqu'à 23 % dans un échantillon du *Challenger* à 4.207 mètres. Le carbonate de magnésie atteint 3,24 % et résulte sans doute d'une concentration analogue à celle qui se produit sur les récifs coralliens.

III. L'HORIZONTALITÉ PRIMITIVE DES SÉDIMENTS MARINS

Toute notre stratigraphie est fondée sur l'empilement méthodique des sédiments marins dans l'ordre de leur âge, et notre tectonique admet, en principe, que ces dépôts ont commencé par être horizontaux. Quand cette horizontalité n'existe plus, surtout quand la pente est prononcée, nous supposons qu'il y a eu déplacement ultérieur.

Cette idée d'un dépôt horizontal étonne d'abord quand

6. DE LAUNAY.

on voit ce qui se passe dans les mers actuelles. Mais elle apparaît justifiée dans des cas très nombreux par l'examen direct des terrains géologiques, surtout des terrains calcaires, pour lesquels elle constitue un fait d'observation, non seulement dans une carrière ou un ensemble de carrières, mais dans une région assez étendue. Aussi, pour la justifier et l'expliquer, a-t-on admis quelque temps une théorie dite de l'abrasion marine, d'après laquelle tout retour de la mer aurait été précédé d'un nivellement des terrains anciens, sur lesquels les terrains nouveaux auraient commencé alors à se déposer en discordance. Pour admettre une telle théorie comme une loi générale, il faudrait admettre que les fonds de mer aux époques géologiques ont été complètement différents des fonds de mer actuels, du moins dans la partie destinée à revenir ensuite au jour. Cela suppose implicitement que le dessin des mers actuelles a été tracé dès l'origine, qu'elles ont été douées d'un destin privilégié et qu'il a existé en outre d'autres mers précaires ayant donné lieu à nos sédiments géologiques : mers qui, par un hasard bien singulier, se trouveraient actuellement toutes émergées. Je crois, pour ma part, qu'une abrasion antérieure à une transgression marine (et non contemporaine) a pu se produire dans certains cas particuliers, comme cela semblerait avoir eu lieu, si aujourd'hui la mer venait recouvrir les plateaux de la Picardie et de l'Artois, mais qu'à côté des régions aplanies, il a dû, à toutes les époques, exister des fonds de mer aussi irréguliers que les fonds de mer actuels. L'idée de l'horizontalité demande donc à être discutée d'autant plus attentivement qu'on l'invoque plus souvent, de manière à préciser dans quelle mesure elle est exacte ¹.

1. Voir dans *la Science Géologique*, p. 19, une discussion plus complète des principes stratigraphiques.

En résumé, cette affirmation, qui est due à Nicolas Sténon et qui remonte à 1669, nous paraît devoir être considérée comme une de ces approximations, grâce auxquelles la science s'élève de palier en palier, professant constamment des vérités relatives, qui se rapprochent peu à peu de la vérité absolue, sans jamais l'atteindre. Il appartient à l'actualisme de nous montrer dans quelle mesure cette affirmation commode est exacte et quelles sont les corrections à lui faire subir.

Tout d'abord, on doit restreindre l'axiome aux dépôts marins, en éliminant les dépôts lacustres et fluviatiles, auxquels il ne s'applique qu'en partie. Mais est-il vrai que les dépôts marins aient tous commencé par être horizontaux et indéfiniment horizontaux ? Dès le premier examen, des restrictions s'imposent. Les sédiments qui s'accumulent sur toute l'étendue de nos océans représentent tous au même titre la même étape actuelle de la géologie. Or ils sont à des profondeurs qui peuvent varier de 0 à 10.000 mètres et non pas seulement par des pentes brusques, mais par de brusques redents succédant à des paliers. A toutes les époques il a dû en être ainsi.

Lorsqu'on trouve, le long de la côte ouest-américaine, des abîmes de 4 et 5.000 mètres succédant immédiatement à des chaînes de même relief ; quand, au sud des Aléoutiennes ou à l'est du Japon, à l'est des îles Tonga (au nord de la Nouvelle-Zélande), à l'est de l'Australie, etc., on tombe brusquement dans des gouffres dont l'un atteint 9.700 mètres, en présence de dénivellations qui se chiffrent donc par plus de 10 kilomètres sur 200 ou 300 kilomètres de large, il n'est plus possible de parler de pentes douces. De même pour les trous de la mer des Caraïbes qui atteignent 5.200 mètres, ou, en plus petit, pour les 3.000 mètres

qu'on rencontre à 15 kilomètres sud de la Crète, ou, en cas contraire, pour ces chaînes d'îles et de hauts fonds que nous voyons surgir au milieu du Pacifique, comme les sommets d'une chaîne submergée. Tout ce que l'on peut apporter comme correctif, c'est que, sur les fortes pentes, les dépôts doivent malaisément tenir, en sorte que les sédiments proprement dits un peu épais doivent avoir une tendance à se répartir par larges paliers, les inégalités antérieures du sol ayant été immédiatement comblées par les premiers apports.

Pour nous borner à deux exemples principaux, la topographie de l'Atlantique est assez simplement caractérisée par deux zones profondes Nord-Sud que sépare un plateau surélevé à événements volcaniques. Dans le Pacifique, il y a, d'abord, le long des côtes, des fosses profondes en rapport avec les chaînes plissées des rivages. Mais il y a aussi une grande série de fosses Est-Ouest à direction méditerranéenne allant de la Chine vers le golfe du Mexique et, vers le Sud, une fosse Nord-Sud perpendiculaire aux précédentes qui passe à l'est de la Nouvelle-Zélande : fosse ayant, par conséquent, une direction analogue à celle du continent américain ou de l'Atlantique. Ces accidents montrent assez la complexité d'allure de cet océan et, par conséquent, de ses dépôts.

L'allure horizontale ne représente donc qu'une tendance approximative destinée à s'accroître avec le temps par l'effet même du nivellement dû aux apports et aux érosions. Il suffit également de regarder une côte pour voir que, si les argiles y sont relativement planes, les sables et surtout les galets peuvent y affecter de fortes pentes. Aux grandes profondeurs, l'horizontalité est beaucoup mieux réalisée par les calcaires. Mais, un peu partout, il n'est pas douteux

que chaque facies lithologique cesse latéralement pour faire place à un facies différent et que son étendue, surtout si les dépôts terrigènes y interviennent, est très limitée. On doit considérer de même n'importe quelle couche représentative d'un âge déterminé comme affectant une forme lenticulaire. Dans le même laps de temps, il s'est déposé, suivant les points, des sédiments plus ou moins épais.

BIBLIOGRAPHIE

1871. DELESSE. *Lithologie du fond des mers.*
1891. MURRAY et RENARD. *Deep sea deposits.* (Expédition du Challenger.)
1897. CAYEUX. *Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires.* (Lille, Le Bizot.)
1904. THOULET. *L'océan.* (Hachette).
1908. COLLET. *Les fonds marins* (Doin) (avec index bibliographique, p. 307).
1914. L. DE LAUNAY. *La géologie du fond des mers. Conférence à l'Institut Océanographique.* (*Revue scientifique*, 3 janvier 1914.)
1924. JACQUES DE LAPPARENT. *Leçons de pétrographie.* (Masson).

CHAPITRE IV

L'INTÉRIEUR DE LA TERRE

I. OBSERVATIONS PHYSIQUES

Les forces que nous venons de voir en jeu à la surface de la Terre, les érosions, les sédimentations, les dissolutions, les précipitations, les cristallisations suffisent pour faire comprendre la plupart des phénomènes tranquilles auxquels nous assistons et, en les amplifiant, en les prolongeant, ils expliquent aussi la stratigraphie du passé. On a essayé parfois d'aller plus loin et de réduire toutes les formations terrestres à cet actualisme de surface ; sous des formes plus ou moins déguisées, cette tendance reparaît de temps en temps dans la science. Mais les manifestations les plus grandioses et les plus incontestables de la géologie échappent à des interprétations semblables : les déplacements des mers, les surrections des montagnes, les mouvements lents ou brusques de l'écorce, le volcanisme, etc. Il faut alors de toute nécessité invoquer d'autres forces qui prennent leur origine dans l'intérieur de la Terre : qu'elles se traduisent ou non par une activité ignée. Nous sommes amenés ainsi à chercher ce que nous savons et ce que nous pouvons raisonnablement supposer sur l'intérieur de notre planète.

Les constatations directes se bornent à peu de chose. Nos travaux de mine et nos sondages les plus profonds n'attei-

gnent pas deux kilomètres. Les dénivellations de la surface, qui peuvent avoir pour effet de ramener au jour et de nous faire connaître des parties profondes, restent inférieures à 20 kilomètres. Plus indirectement, quand nous apprendrons à mesurer la zone d'ébranlement des tremblements de terre, nous verrons qu'elle paraît se tenir au plus entre 10 et 30 kilomètres ; elle ne nous apporte donc, elle aussi, d'enseignement que sur une zone très superficielle. Ce sont là des chiffres bien faibles, rapportés à un rayon terrestre de 6.400 kilomètres. Cependant, pour ce qui se passe au-dessous de cet épiderme, nous possédons aussi quelques données.

Le problème peut être envisagé physiquement ou géologiquement. Je serai bref sur le côté purement physique, dont je me suis trouvé traiter incidemment quelques points en étudiant plus haut l'Astronomie de la Terre et les anomalies du géoïde terrestre¹. Bornons-nous aux conclusions principales, qui nous seront indispensables plus tard !

Par exemple, nous pouvons mesurer la densité moyenne de la Terre, peser la Terre tout entière dans notre balance, en comparant son attraction sur une sphère métallique à celle d'une autre sphère ayant une densité connue. On trouve ainsi une densité moyenne de 5,50, alors que l'écorce superficielle varie entre 2 et 3. D'où l'idée d'un noyau métallique accumulant les métaux les plus denses, tels que le radium, dans la partie centrale : ce qui concorde avec la loi de répartition atomique. D'après cette loi, le silicium et l'aluminium, éléments prépondérants de l'écorce scoriacée, doivent cesser assez rapidement en profondeur, sans qu'il soit possible de préciser cette profondeur en kilomètres².

1. *Où en est la géologie ?* p. 130 à 141.

2. On a parlé de 1.200 kilomètres. Je crois à un chiffre beaucoup plus faible.

Après quoi viendraient successivement : 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, dont la transmutation progressive, avec mise en évidence d'énergie interne, pourrait contribuer à entretenir la chaleur terrestre.

D'autre part, dans le chapitre VI consacré en partie aux tremblements de terre, j'expliquerai comment la transmission des ondulations sismiques à travers notre globe conduit à lui supposer une très forte élasticité analogue à celle de l'acier. La même élasticité a été retrouvée par des procédés divers (pendule horizontal, niveau de Michelson, etc.). On a cru reconnaître ainsi que la superficie du globe subit une marée journalière de 15 centimètres, à peu près le tiers de ce que donnerait la théorie si le globe était parfaitement liquide. La Terre se comporte comme un bloc d'acier froid : ce qui d'ailleurs ne nous apprend rien sur les états réels de la matière soumise aux pressions formidables qu'elle doit supporter dans les parties centrales du globe. C'est ce bloc élastique de métaux à enveloppe rocheuse qui se déplace et tourne en vibrant, en se gonflant et se dilatant périodiquement sous des influences multiples (chaleur solaire, attraction lunaire, etc.) à travers l'espace. Le même noyau conducteur enveloppé de fer, animé d'une rotation rapide dans le champ magnétique solaire, subit un afflux constant d'électrons, auxquels est dû son magnétisme. Il est très singulier que l'axe magnétique, à peu près concordant avec l'axe géographique, accuse un mouvement séculaire, où se manifeste l'effet d'on ne sait quelle force extrêmement puissante.

En résumé, nous venons de constater deux systèmes de forces principales qui, les unes et les autres, d'après les

idées actuelles, sont d'origine électro-magnétique : l'attraction newtonienne et le magnétisme. Ces forces sont nécessairement influencées par la constitution interne de la Terre et il est naturel de chercher si leurs variations aux divers points de la superficie ne pourraient pas nous avertir sur ce qui se passe profondément. On peut, comme je l'ai rappelé, mesurer l'attraction par le pendule ou par le fil à plomb, le champ magnétique terrestre par les déviations d'une aiguille aimantée ; on détermine ainsi les anomalies locales, sur lesquelles les théoriciens ont commencé par fonder beaucoup d'espairs.

A vrai dire, ces espairs ont été quelque peu déçus et les conclusions les plus vraisemblables auxquelles on est parvenu ne semblent pas dépasser une zone tout à fait superficielle. Dans la plupart des cas, ces anomalies sont représentées par des chiffres très faibles, dont l'ordre de grandeur ne dépasse guère celui des erreurs expérimentales. Si on laisse de côté la reconnaissance de minerais ferrugineux profonds, qui offre seulement un intérêt pratique, on n'a encore résolu ainsi avec quelque certitude aucune des questions préjudicielles que l'on s'était posées : telles que l'augmentation ou la diminution de la densité sous les montagnes et sous les mers, impliquant, dans le premier cas, un excès de matière et dans le second un vide ¹. Nous n'aurions, en tous cas, été renseignés ainsi que sur l'écorce scoriacée et sur son revêtement sédimentaire ; mais ces renseignements auraient été pourtant les bienvenus s'ils avaient un peu fait connaître la zone où les tremblements de terre et le volcanisme semblent prendre leur origine. Tels qu'ils se présentent jusqu'ici, les résultats obtenus par de nombreuses

1. On affirme généralement, mais sans preuve suffisante, l'augmentation d'épaisseur sous les mers.

mesures sont discordants et contradictoires, en grande partie attribuables, sinon à des erreurs d'observation, du moins à des causes d'importance secondaire comme l'abondance et le mode de circulation des eaux souterraines, la composition et la direction des couches, etc. Tout au plus croit-on pouvoir affirmer que les anomalies systématiques suivent souvent les zones disloquées de l'écorce, qui sont, en même temps, les zones sismiques.

Un enseignement d'un genre différent, mais celui-là très précis et d'un intérêt capital, est la constatation et la mesure d'un degré « géothermique ». On sait que, partout, la température s'élève quand on s'enfonce et le nombre de mètres dont il faut pénétrer dans le sol pour gagner un degré est ce qu'on appelle le degré géothermique. Naturellement, comme pour toutes les autres observations profondes, nous sommes très limités et nous ne pouvons affirmer ce phénomène d'échauffement interne que pour les deux kilomètres d'épaisseur où nous l'observons. Mais il est trop conforme avec toutes nos idées sur le passé cosmique de la Terre pour que nous ne soyons pas disposés à en conclure aussitôt et indépendamment de toutes les autres observations géologiques, la probabilité d'un échauffement général en profondeur. Cet échauffement, simplement calculé pour les 100 premiers kilomètres par une extrapolation bien vraisemblable, amène à supposer, vers cette profondeur, un état presque général de fusion.

La température continue-t-elle à s'accroître jusqu'au centre, ou, après avoir passé par un maximum, se réduit-elle, nous l'ignorons. Nous ne pouvons dire non plus si la source d'énergie qui produit cette chaleur la fournit à l'état libre ou à l'état potentiel, sous la forme d'une ignition perpétuée, ou sous la forme d'une transmutation succédant

à une condensation inverse de la chaleur en énergie atomique. Mais, de toutes manières, elle se dépense au dehors et, par conséquent, elle s'amoindrit. Entre l'espace interplanétaire à la température du zéro absolu et ce foyer interne, l'écorce superficielle joue le rôle d'un mur que traverse un flux de calories allant de la source chaude à la source froide. Ce mur lui-même doit théoriquement garder, jusqu'à nouvel ordre, la même distribution des températures ; mais la source chaude interne tend nécessairement, sinon à se refroidir, du moins à s'appauvrir en énergie et cela de préférence dans sa zone la plus haute.

Il est à noter que, lorsque nous nous enfonçons de quelques mètres au-dessous de la superficie, échappant ainsi aux influences extérieures, dans une cave ou dans un souterrain, nous trouvons la température d'équilibre, variable suivant les régions mais constante en un même point, qui correspond aux deux flux inverses et contrebalancés de calories chaudes et de calories froides. A la surface même, l'influence interne, qui est constante, se trouve masquée par les influences variables de l'extérieur qui se superposent à elles et la température de l'air semble uniquement résulter des modifications dans la position du soleil, dans le régime des vents, dans l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons solaires, etc., etc. Si l'on pouvait s'élever assez pour sortir de l'atmosphère, on resterait, pendant des milliers de kilomètres, en équilibre de température avec la seule source froide, à 270°. Inversement, en pénétrant dans l'intérieur de la terre, on se rapprocherait des conditions de la source chaude.

On remarquera à ce propos que, d'une part autour de la source froide et, de l'autre, autour de la source chaude, il existe une zone très étendue dans laquelle la température

ne varie pas ; après quoi, elle se modifie lentement ; et les variations deviennent particulièrement rapides dans la zone où se produit le conflit des deux sources : c'est-à-dire dans la superficie que nous observons. Contrairement à ce qu'on pourrait penser d'abord, les variations de température qui produisent le degré géothermique doivent ainsi tendre à s'atténuer quand on s'enfonce et l'on a cru quelquefois le constater.

Cette notion du degré géothermique soulève une observation essentielle qui est trop habituellement passée sous silence. On s'imagine souvent que ce degré reste à peu près le même sur tous les points du globe, environ de 30 mètres pour un degré ; et cela est vrai, en effet, pour de nombreux sondages que des nécessités pratiques conduisent à placer dans des conditions analogues, pour aller chercher de l'eau, du sel, de la houille, du pétrole, sous une épaisseur tranquille de strates sédimentaires : en particulier en France, en Allemagne et en Angleterre. Mais cela devient absolument faux quand on aborde des régions d'une constitution géologique différente, considérée par nous comme plus anciennement ou plus récemment consolidée. La conclusion à laquelle nous arrivons ainsi est que chaque zone de consolidation, correspondant, comme nous le verrons, à la cessation plus ou moins ancienne des plissements, possède un degré géothermique qui lui est propre et qui reste à peu près le même sur sa longueur, mais qui varie, au contraire, dans de très fortes proportions en passant d'une zone à l'autre.

Plus une zone est anciennement stabilisée, plus le degré géothermique y est fort, plus il faut franchir de mètres pour gagner un degré : ce qui amène à penser que l'écorce, jouant le rôle de mur, y est particulièrement épaisse. Plus la zone

examinée est instable, fragile et soumise à des manifestations sismiques qui manifestent cette instabilité, plus le degré géothermique y est faible et plus nous sommes conduits à supposer que l'écorce solide est mince. Ce degré géothermique, qui atteint 100 et 120 mètres sur les chaînes archéennes du Canada ou dans la partie Nord-Est des États-Unis, descend à 60 mètres sur une chaîne d'âge carbonifère comme la Bohême, aux 30 mètres classiques dans le bassin de Paris ; à 16 mètres dans le Colorado, pays à éruptivité éteinte mais tertiaire ; à 14 mètres en Auvergne, pays à volcanisme récent ; à 10 mètres et moins dans les zones de volcans en activité.

Nous sommes ainsi amenés à penser que l'épaisseur de l'écorce solide, du mur interposé entre nous et le foyer interne, doit être très variable suivant les régions et variable d'après une loi que l'on peut moyennement prévoir. Elle serait, par exemple, particulièrement forte sous la ceinture de grands plateaux archéens qui occupent le Nord de l'Amérique, de l'Europe et de l'Asie ; de même sous les plateaux analogues qui forment le Brésil, l'Afrique australe ou l'Inde. Il y aurait, au contraire, des fuseaux d'épaisseur très réduite dans les zones dites géosynclinales, où se localisent les montagnes les plus récentes du globe, avec les tremblements de terre et la majorité des volcans. Pour des raisons que nous expliquerons plus tard, ces zones fragiles ont eu, au cours de l'histoire géologique, une tendance à se rétrécir de plus en plus, et, par conséquent, les communications diverses de la superficie avec les parties internes ont dû progressivement se localiser.

Pour des motifs d'un autre genre, on a souvent ajouté, comme zones probablement épaisses et à consolidation avancée, les fonds des grands océans. Cela suppose-t-il implicite-

ment que ces Océans soient des traits primitifs, ou du moins très anciens, de la Terre. Nous avons vu que cette hypothèse, certainement inexacte pour la Méditerranée et l'Atlantique Nord, n'est nullement démontrée ni même probable pour les autres grandes mers. On n'a donc pas d'argument théorique pour supposer cette épaisseur spéciale de la croûte sous les mers et il ne pourrait s'agir que d'un résultat expérimental discutable. La température un peu plus froide de environ 4^o, à laquelle est maintenu le fond des Océans, ne représente qu'une différence insignifiante de quelques degrés avec la température moyenne sur les continents et ne saurait par elle-même exercer une influence appréciable.

La terre se refroidit-elle ou se réchauffe-t-elle ? Jusqu'à la découverte du radium, la première hypothèse semblait hors de doute. La terre paraissait présenter un cas intermédiaire entre celui du soleil, astre en ignition et celui de la lune, astre mort. Toutes les observations géologiques concordait avec l'idée d'une contraction due au refroidissement. Depuis que l'on connaît le radium, on a fait quelques beaux calculs, dans lesquels on attribue à l'ensemble de l'écorce superficielle une teneur en radium conventionnelle, avec une émanation d'énergie intra-atomique prolongée au delà de toute vraisemblance et l'on est arrivé à conclure ainsi que la terre se réchauffe : hypothèse immédiatement professée par quelques physiciens. Nous n'avons aucun moyen de savoir si la Terre, dans l'instant présent, se refroidit ou se réchauffe, et ce n'est pas parce qu'il a existé une époque glaciaire, tenant apparemment à de tout autres causes, que la première idée peut être soutenue. Mais, si même il y avait actuellement un réchauffement momentané, ce serait un phénomène précaire intercalé dans un refroidissement

durable. Ceux qui tiennent, pour des raisons philosophiques, à voir la Terre se réchauffer et les cycles passés recommencer dans un « devenir » indéfini, doivent recourir à quelque théorie comme celle de Sir N. Lockyer, pour lequel, alternativement, les nébuleuses, d'abord froides, sont échauffées par le choc des météorites et forment des étoiles gazeuses, qui ensuite se refroidissent ; ou à celle d'Arrhénius qui compte, pour réchauffer les étoiles mortes, sur le choc d'un autre astre mettant brusquement en liberté son énergie potentielle et provoquant ainsi une « Nova ».

II. OBSERVATIONS GÉOLOGIQUES. LES THÉORIES DE LA COMPENSATION, DE L'ISOSTASIE, DU FLOTTEMENT, etc.

Ce qui nous frappe de plus en plus par le progrès des observations orogéniques, c'est l'extraordinaire mobilité, c'est la flexibilité qu'elles dénotent dans les terrains. La flexibilité n'est uniforme, ni dans l'espace, ni dans le temps, et je développerai tout à l'heure cette idée qu'elle me paraît se restreindre et se localiser peu à peu, en faisant place souvent à des affaissements ou à des surrections limitées par des surfaces planes verticales. Mais, que les terrains se soient déplacés horizontalement sur ces plans de glissement peu inclinés qui provoquent les « charriages », ou qu'ils se soient dénivelés verticalement par des « failles », les mouvements de ce genre atteignant plusieurs kilomètres sont fréquents ; ils arrivent parfois à cent ou deux cents kilomètres de distance horizontale. Bien que de telles affirmations puissent étonner d'abord les non-géologues et leur inspirer quelque scepticisme, elles n'en correspondent pas moins à un fait positif, dont on doit avant tout tenir compte lorsqu'on cherche à se représenter

l'intérieur de la Terre. La considération de ces vastes mouvements est d'autant plus nécessaire dans le cas des charriages que de tels déplacements paraissent s'être réalisés en profondeur, peut-être lentement et sans presque se manifester d'abord à la superficie¹. Quant aux chutes qui ont amené un compartiment de terrain à plusieurs kilomètres au dessous du niveau de la mer, elles supposent également, dans l'intérieur de la Terre, un état qui concorde mal avec les théories actualistes et avec la confiance instinctive que, malgré les tremblements de Terre, nous gardons tous dans la stabilité de l'écorce sur laquelle nous vivons et nous bâtissons.

Le géologue est, lui, si habitué à voir des terrains plissés ou faillés, qu'il est porté, contrairement à l'opinion vulgaire, à considérer ces phénomènes comme tout simples et à oublier tout ce que leur explication offre d'énigmatique. Pourtant, si un compartiment du sol s'affaisse de plusieurs kilomètres par rapport aux compartiments voisins, c'est donc qu'il y a un vide au-dessous de lui. Et la difficulté serait presque la même si on supposait, au lieu d'un mouvement absolu, un mouvement relatif de ce compartiment resté fixe par rapport à ses voisins surélevés. Bien souvent, d'ailleurs, l'affaissement a eu pour résultat de ramener la base de la zone déplacée au-dessous du niveau de la mer. Même difficulté pour les mouvements tangentiels, s'ils se sont, comme on le croit, effectués en profondeur sous un revêtement de terrains qui les comprimaient et qui ont pu insensiblement se soulever. Dans ce cas aussi, si nous répugnons trop à admettre un vide préexistant, nous devons du moins admettre que ce vide se remplit en même temps qu'il se forme.

1. Voir, pour cette théorie des charriages, *Où en est la géologie ?* ch. II.

Rappelons-nous, d'autre part, que la croûte pierreuse de la Terre nous a paru devoir être généralement liquéfiée vers 70 à 100 kilomètres de profondeur moyenne. Cette croûte pierreuse, appelée *lithosphère*, passe là à une zone ignée dite *pyrosphère* et c'est très probablement dans la zone intermédiaire entre la lithosphère et la pyrosphère que les mouvements en question prennent leur origine. Nous ne savons aucunement ce qui existe plus profondément, quelle épaisseur occupe la pyrosphère et ce qui lui succède. C'est uniquement pour tenir compte des observations précédentes sur la densité et l'élasticité terrestres que l'on suppose là un noyau lourd et métallique, la *barysphère*, dont on assimile l'état physique, très hypothétiquement, à un gaz sous une pression formidable.

Que se passe-t-il entre la lithosphère et la pyrosphère ? La plupart des théories admettent comme évident que la lithosphère flotte sur la zone en fusion, ou du moins qu'elle y trempe par sa base. Le fait peut être exact, mais il ne paraît nullement certain et l'on conçoit très bien une sphère creuse, dans laquelle il y aurait un noyau igné entouré, au moins localement, de cavités remplies par des fumerolles gazeuses. La croûte solide, dont la température doit rester à peu près immuable, peut parfaitement former voûte au-dessus d'un noyau, sur lequel porte le refroidissement et, par conséquent, la contraction. Il ne faut jamais oublier qu'il s'agit là de substances tout à fait hétérogènes.

Admettons cependant la théorie habituelle. Il y a contact des matières en fusion et des matières solides. Dans ce cas, nous pouvons aisément admettre que cette zone de contact n'est pas stable. Le seul jeu des marées internes doit exercer de fortes pressions sur l'enveloppe. S'il y a refroidissement et, par conséquent, contraction, il y a affaissement de la

base solide. Celle-ci peut se refondre comme un iceberg arrivant dans un courant chaud. Cette contraction, si contestée qu'elle ait pu être dans ces derniers temps, est encore le meilleur moyen d'expliquer en gros les plissements par l'introduction d'une enveloppe solide devenue trop large dans une sphère contractée de rayon moindre. En particulier, il est intéressant de constater, comme nous le ferons au chapitre suivant, que la solidification de la croûte paraît avoir gagné progressivement depuis le pôle Nord jusqu'à la Méditerranée.

Pourquoi le ridement se produit-il ici plutôt que là ? Dans la théorie dite de la *compensation*, la répartition des masses serait partout la même ; il y aurait donc, sous les saillies montagneuses, un déficit de masse entraînant une fragilité spéciale et, sous le creux des Océans, un accroissement de masse rendant leur fond particulièrement solide. Nous ne voyons là qu'une pure hypothèse, à laquelle on n'apporte aucune preuve.

La théorie de l'*isostasie* est à la fois plus rationnelle et plus en rapport avec les observations. On suppose que l'accumulation des sédiments dans les synclinaux marins y déterminerait un relèvement des isogéothermes, un réchauffement ayant pour effet d'augmenter la plasticité. Par là, une dépression commencée s'accroîtrait d'elle-même, en provoquant un refoulement latéral des matières sous-jacentes vers les continents voisins.

C'est, en effet, un fait très curieux que la tendance persistante à l'affaissement de certaines zones et à un affaissement qui semble réglé mécaniquement par l'apport des sédiments. On rencontre souvent ainsi des fosses dans lesquelles se sont accumulées des épaisseurs considérables de terrains tous pareils, tous formés sous une presque égale épaisseur

d'eau et il est difficile de ne pas en conclure qu'il y a un rapport de cause à effet entre ces deux mécanismes synchroniques. Cela n'est pas seulement vrai pour ces zones étroites et longues, dites géosynclinales, que l'on a considérées comme l'origine des plis montagneux, mais aussi pour d'immenses bassins de sédimentation continués à travers plusieurs périodes géologiques, comme le Karoo sud-africain, ou le Gondwana indou. Comment ne pas penser aussi à quelque chose de ce genre quand on voit, dans le bassin de Paris, tous les terrains successifs s'emboutir suivant la même forme en cuvette ; quand on rencontre des épaisseurs si imprévues de sédiments dans une fosse telle que la Limagne ? Il y a donc eu là flexion progressive de la zone centrale au fur et à mesure du comblement . Enfin, ce rapport d'origine entre la sédimentation et le plissement pourrait expliquer la différence si marquée entre la structure de la Terre, globe à sédimentation active et la Lune, globe à sédimentation nulle, où n'apparaît rien d'analogue à un plissement. Mais l'hypothèse de l'isostasie n'en est pas moins encore une simple hypothèse, susceptible de nombreuses objections.

On a supposé récemment, — et j'ai fait plus haut allusion à cette idée, — que les continents flottaient sur une mer de feu intérieure, où Lippmann imaginait les montagnes s'enfonçant par leur poids comme des navires, où Wegener fait voguer l'Europe et l'Amérique à la dérive. Suivant ce dernier, les deux continents auraient été d'abord collés l'un contre l'autre, ce qui expliquerait à la fois le parallélisme de leurs bordures et les rapprochements de faune sur lesquels on s'est fondé pour admettre un continent atlantique. Puis une crevasse se serait élargie. Mais, naturellement, il en résulterait, en sens inverse, une pression qui amènerait le développement des plis dans l'Ouest de l'Amérique et sur

l'Est du continent Eur-Asiatique, avec des fissures volcaniques formant un cercle de feu autour du Pacifique. Ici aussi, l'idée est plutôt ingénieuse que vraisemblable et nombreux sont les faits qui la contredisent.

En résumé, nous sommes dans l'ignorance sur l'origine profonde des plissements et des fractures. Mais nous pouvons, je crois, constater une évolution qui tend peu à peu à localiser le phénomène et à lui imprimer une allure différente. Comme nous le verrons au chapitre suivant, les zones plissées semblent perdre en largeur et peut-être gagner en hauteur. Le progrès de la consolidation profonde a, en outre, pour effet, de réduire la flexibilité pour la transformer en éclatements. Si l'on schématise les faits en quelques mots, on dira que le plissement constitue la forme archaïque et que la forme moderne est un éclatement en dents de scie. Cependant il peut y avoir encore tendance au plissement dans la dernière zone sismique de notre Europe, le long de la Méditerranée et il est possible aussi que des manifestations profondes ignorées de nous aient simplement pour conséquence superficielle le très léger déplacement et gauchissement observé souvent sur nos rivages.

III. LE FOND DES SÉDIMENTS. LES PROBLÈMES DES GRANITES ET DES GNEISS

Nous avons vu, jusqu'ici, dans quelle mesure on peut préjuger ce qui se passe dans les régions profondes de la Terre inaccessible à l'homme. Nous abordons maintenant un problème moins aventureux et nous nous demandons simplement ce que l'on rencontrerait si, n'importe en quel point de la Terre, on franchissait par un sondage l'épaisseur du



manteau sédimentaire. C'est, en somme, le terme extrême de la série stratigraphique, — sinon d'une façon absolue le plus ancien, du moins localement le plus profond — que nous essayons de connaître, comme, au-dessous du tertiaire, on peut prévoir la présence du secondaire et, sous celui-ci, du primaire.

Quand nous parcourons un pays quelconque pour en examiner la géologie, ou, plus simplement, quand nous feuilletons des cartes géologiques où sont figurés par des couleurs appropriées les terrains de la superficie, nous observons une énorme prédominance des terrains sédimentaires sur les roches cristallines : surtout si nous assimilons, comme nous allons l'expliquer, les gneiss et les micaschistes à des sédiments. Ce que nous voyons un peu partout, ce sont des calcaires, des sables, des grès, des argiles et des schistes. Il faut un certain effort d'abstraction pour supprimer par la pensée ce manteau de sédiments et se le représenter très mince comme il l'est en effet.

Prenons, pour préciser, une région française à caractère nettement sédimentaire comme le bassin de Paris et un point, tel que Paris, occupant le centre de la cuvette ; nous sommes conduits à penser par les coupes géologiques que l'épaisseur des sédiments secondaires et tertiaires ne doit pas dépasser deux ou trois mille mètres et qu'au-dessous on trouverait quelque chose comme la Bretagne ou les Vosges, des tronçons de sédiments primaires plissés et eux-mêmes très limités en profondeur au milieu de terrains cristallophylliens et de granite. A 5 ou 6 kilomètres au plus en profondeur, nous n'aurions probablement partout plus aucune trace de sédiments.

Il est vrai que les épaisseurs rencontrées sont souvent supérieures aux épaisseurs prévues. Dans la plupart des

sondages entrepris pour une raison industrielle sur une semblable cuvette sédimentaire, par exemple dans le bassin du Rhône, dans la Limagne, etc., on a été surpris par un développement des sédiments que n'avaient pas fait prévoir leurs zones d'affleurement et l'on a pu en conclure que la sédimentation, et l'affaissement dont cette sédimentation résultait, avaient dû être particulièrement actifs dans le centre de ces cuvettes. Mais, en tous cas, il s'agit de quelques milliers de mètres et, au-dessous, la croûte terrestre est entièrement débarrassée de ces sédiments qui nous occupent si exagérément à la surface. Qu'y a-t-il donc en profondeur et comment est constituée la base de nos formations sédimentaires ?

D'une façon générale, nous dirons qu'à la base de la série stratigraphique, on rencontre deux formations problématiques de roches cristallines : les unes grenues, dont le granite est le terme le plus connu ; les autres zonées, analogues à ce qu'on appelle les gneiss ; les gneiss paraissant eux-mêmes en moyenne superposés aux granites. Quant aux autres types de roches cristallines que nous pourrions nous attendre à trouver, elles se font rares en profondeur et cela correspond aux conditions dans lesquelles nous les observons plus haut, aussi bien qu'à leur mode de cristallisation probable déduit d'expériences synthétiques. Intrusions, filons, coulées superficielles, les masses de telles roches que l'on peut assimiler à des porphyres ou à des laves sont d'ordinaire minces et l'on sait qu'en les traversant par un sondage on retrouvera autre chose, généralement un sédiment, au-dessous. Mais au-dessous du granite, on ne trouve rien, à moins d'un déplacement mécanique tout à fait exceptionnel. Qu'est-ce que le granite, qu'est-ce que le gneiss, et pourquoi ces deux formations occupent-elles cette situation exceptionnelle ?

Dans le granite, ce qui frappe aussitôt, c'est son homogénéité sur de très vastes étendues. À l'examen microscopique, c'est, en outre, le fait que la consolidation de ce magma homogène, qui occupe des kilomètres cubes, s'est faite visiblement en une seule fois, et non, comme pour les roches volcaniques ou laviques, en deux ou trois temps impliquant un déplacement du magma igné pendant les étapes successives de sa consolidation. On peut ajouter que les roches granitiques sont les seules dont la synthèse n'ait pu être réalisée dans nos laboratoires, avec les conditions de pression dont on disposait au moment où ces expériences synthétiques ont été tentées pour la dernière fois. Enfin, si l'on examine la périphérie des massifs granitiques, on constate habituellement que ces massifs plongent sous d'autres terrains comprenant habituellement des gneiss à la base et l'on est amené ainsi à admettre que cette cristallisation s'est effectuée en profondeur sous un épais couvercle de terrains, aujourd'hui éliminés par l'érosion là où le granite affleure au jour, avec substitution partielle à ces terrains. Cette hypothèse explique, en même temps, l'homogénéité et les difficultés de synthèse.

Nous supposons donc que la profondeur des terrains est partout occupée par des roches granitiques; ce terme général impliquant un type de structure grenue, qui a pu être réalisée avec des compositions chimiques et, à plus forte raison, des formations minéralogiques très diverses.

La composition chimique, à son tour, différencie des « provinces pétrographiques », caractérisées notamment par la prédominance de telle base dans toutes les roches de structures différentes que présente la région. Le fait, ainsi constaté, peut avoir deux explications. La première qui vient à l'esprit est que les granites et les roches assimilables se

sont incorporé les sédiments très variables ou les autres roches antérieures qui pouvaient se trouver à leur contact. La façon dont certains massifs rocheux se présentent dans les terrains conduit à les supposer entièrement substitués à des sédiments, tels que des calcaires ou des dolomies. Ils nous apparaissent ainsi comme pouvant en être à leur seconde ou troisième fusion. La composition de ces terrains absorbés et refondus influe nécessairement sur celle des granites eux-mêmes : par exemple, pour forcer la proportion de chaux, de silice ou d'alumine. Mais elle explique difficilement ce qui est peut-être le plus manifeste dans cette composition chimique : l'abondance particulière, suivant les cas, de la potasse ou de la soude et, toutes les fois que l'on constate nettement une substitution à un terrain préexistant, on observe, dans le granite substitué, des éléments qui ne viennent pas du terrain, mais que lui-même a apportés de la profondeur en se mettant en place. Parmi les alcalis, la soude pourrait à la rigueur, provenir de quelques gîtes salins enfouis ; mais la potasse est si rare dans nos sédiments qu'il faut chercher une autre explication. On est ainsi conduit, comme nous le disions dans le premier chapitre à propos de la métallogénie, à imaginer que, par endroits, il a pu se faire, dès la période fluide de la Terre, certaines concentrations tourbillonnaires de métaux empruntés à des zones plus profondes et susceptibles d'être remises en mouvement par volatilisation ou refusion : concentrations qui ont pu ensuite, soit provoquer un gîte métallifère proprement dit, soit se diffuser dans la masse des roches granitiques.

J'ajoute encore que les granites les plus vulgaires représentent, en principe, des roches assez notablement siliceuses tenant de 65 à 75 % de silice ; mais la teneur en silice peut s'abaisser progressivement, la structure restant analogue :

50-62 % dans les syénites ; 48-55 % dans les diorites ; 48-52 % dans les gabbros ; 35-45 % dans les péridotites. Il semble que l'abondance plus ou moins grande de la silice dans les roches provenant d'un même lit de fusion ait eu pour résultat de donner des scories plus ou moins légères, en sorte que les roches les plus siliceuses constitueraient une écume superficielle et les roches les plus basiques un fond de creuset. La proportion d'oxygène diminue en même temps : ce qui correspond bien avec un phénomène plus profond. De plus, on voit apparaître, dans les roches que nous supposons ainsi les plus profondes, des métaux à poids atomique élevé et restés à l'état natif comme le platine ou le fer nickelifère, des métaux à oxydation incomplète comme la magnétite et le fer chromé, les protoxydes de nickel ou de fer. On est conduit à assimiler les météorites, dans lesquelles la silice peut arriver à faire complètement défaut et qui contiennent elles aussi du fer nickelifère avec des roches particulièrement profondes.

C'est la composition chimique qui caractérise réellement les roches, beaucoup plus que le groupement de leurs éléments en tels ou tels minéraux : groupement que des refusions suivies de recristallisations peuvent modifier.

Quant aux gneiss, ils sont, comme le granite lui-même, le résultat d'un métamorphisme régional effectué en profondeur, et nous admettons qu'ils se sont produits lorsque des sédiments antérieurs ont été, par l'effet d'un mouvement orogénique, ramenés à une profondeur suffisante pour subir l'action des magmas ignés, et de leurs fumerolles minéralisantes. Les gneiss, comme les granites, paraissent avoir cristallisé sur place, par un phénomène accompli à haute pression, mais tranquille, dans lequel des éléments de sédiments presque intacts, qui nous montrent

l'allure antérieure des terrains, ont pu se trouver ménagés et garder leur disposition première. Tandis que, dans les granites, la fusion ou la refusion domine et a pu réaliser l'homogénéité de structure, ici l'on a eu plutôt diffusion d'éléments actifs et minéralisateurs dans l'épaisseur des terrains stratifiés, avec quelques apports plus localisés qui ont pris l'allure de couches. La caractéristique des gneiss est d'avoir conservé l'allure zonée des schistes, grès ou calcaires, dont ils occupent la place, tout en recevant un apport de silice et d'alcalis et en recristallisant. Quelquefois aussi des pseudo-gneiss résultent d'un laminage mécanique appliqué à de véritables granites : de ce qu'on appelle un « dynamométamorphisme ».

Pétrographiquement, on constate souvent le passage périphérique des granites aux gneiss. La zone extérieure des granites commence à se charger d'éléments sédimentaires non digérés. Puis on trouve des gneiss pénétrés de veines granitiques, puis des gneiss proprement dits et, en s'écartant toujours du granite, des micaschistes, dans lesquels l'apport par fumerolles peut se réduire à de simples veines de pegmatite ou de quartz, la cristallisation ayant seule opéré, ou enfin des schistes et grès à peine altérés, dans lesquels l'action métamorphique, exercée à distance, se traduit simplement par le développement de certains minéraux spéciaux.

La théorie que j'expose là est relativement récente et l'on peut encore lire, dans les traités de géologie classiques remontant à une quarantaine d'années, que les gneiss étaient alors considérés comme la première croûte de consolidation du globe. Plus généralement, on enseigne encore parfois que les terrains « cristallophylliens » ou « archéens », dont les gneiss sont le meilleur représentant, se trouvent aujourd'hui,

ou se sont trouvés un moment partout, à la base de toute la série stratigraphique. Les faits doivent, je crois, être présentés un peu différemment, et nous sommes ramenés ainsi à la question que nous nous posions au début de ce paragraphe. D'après la théorie exposée plus haut, on voit que les gneiss peuvent représenter n'importe quel terrain de la série sédimentaire, pourvu que ce terrain ait été exposé à l'action des manifestations ignées internes dans les conditions de profondeur nécessaires. Il peut y avoir des gneiss primaires, secondaires ou tertiaires et, dans la même région où l'on trouve de tels gneiss, les terrains dont ils proviennent peuvent subsister intacts, ainsi que les terrains antérieurs sur lesquels ils reposent, sans parler même des charriages qui peuvent, comme dans le pays basque, amener un gneiss passant littéralement à du silurien non modifié par dessus du crétacé. Mais on conçoit aisément que, plus un terrain est ancien et situé par conséquent vers la base de la série stratigraphique, plus il a eu de chances d'être soumis à **une** recristallisation semblable, puisqu'il a été exposé plus longtemps à la possibilité d'un tel phénomène et puisque, par sa position propre, il y a été exposé dans des conditions plus favorables. De plus, le métamorphisme dit « régional », dont procèdent les gneiss, est, par sa nature même, un phénomène très extensif, ayant agi à de grandes distances et le cas que je supposais tout à l'heure théoriquement de terrains antérieurs à un certain gneiss s'étant conservés intacts dans son voisinage, s'est assez rarement réalisé. Il est donc pratiquement très habituel de trouver des gneiss à la base de la série sédimentaire et la plupart des gneiss sont fort anciens, bien qu'on puisse en rencontrer de tous les âges.

BIBLIOGRAPHIE

1889. DUTTON. *On some of the greater problems of physical geology.* (Bull. of the Philos. Soc. of Washington).
1893. MICHEL LEVY. *Contribution à l'étude du granite de Flamaville.* (Bull. Serv. Carte géol., V, n^o 36).
1919. WEGENER. *Die Entstehung der Continente und Ozeane* (3^e édition).
1920. TERMIER. *Les grandes énigmes de la Géologie* (Revue des questions scientifiques, janvier 1920).
1923. TERMIER. *La déformation de la surface terrestre au cours des âges.* (Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse, avril 1923).

CHAPITRE V

L'ÉVOLUTION DE LA STRUCTURE TERRESTRE. LES MONTAGNES ET LES MERS

I. LES LOIS DE L'ÉVOLUTION STRATIGRAPHIQUE. LES TRANS- GRESSIONS ET LES RÉGRESSIONS

Pour raconter une histoire, il faut une chronologie et des divisions en étages. Les géologues, je l'ai dit, sont dans l'impuissance de chiffrer les périodes en années ; mais ils connaissent l'ordre de succession des événements et leur synchronisme. Ils le savent, soit par l'observation directe, soit par la paléontologie qui confirme et qui précise. Les divisions ont été fondées de préférence sur quelques grands changements dans la structure et dans la faune. Intéressantes pour la région où elles ont été établies, elles demeurent conventionnelles pour l'ensemble du globe, si petit qu'il soit ; mais, comme toutes les conventions anciennes, elles sont utiles à garder sans changement, sauf à en connaître l'arbitraire.

Ainsi armé, quand on veut, comme nous allons l'essayer dans ce chapitre, exposer l'évolution de la structure terrestre, on peut adopter l'ordre historique ou l'ordre géographique. Dans la plupart des traités de géologie, on prend successivement chaque période de temps, aussi subdivisée que possible

et on décrit les représentants de ce niveau dans les divers points de la Terre. Cette stratigraphie, pour être utile, doit être tout à fait détaillée et complète. On peut également, comme on le fait dans les monographies locales et comme je l'ai tenté, d'une manière plus étendue, pour l'ensemble de notre pays¹, parcourir les diverses régions en reconstituant, pour chacune, son histoire et en insistant alors sur sa tectonique. Les deux méthodes impliquent nécessairement, pour le lecteur, une connaissance approfondie de la Géographie actuelle, la compréhension des termes techniques, au moyen desquels on définit les âges, et même la connaissance des formes paléontologiques, qui aident à la distinction des niveaux. Je vais envisager ici les faits dans l'ordre historique ; mais je ne puis songer en quelques pages à écrire leur histoire, si rapide qu'on la suppose et je voudrais plutôt mettre en évidence, par des exemples, le mécanisme des phénomènes que raconter ces phénomènes eux-mêmes, leur stratigraphie et surtout leur tectonique².

Stratigraphiquement, chaque époque a connu des mers profondes avec leurs dépôts crayeux, des rivages avec leurs argiles, leurs sables et leurs galets, des continents avec leurs fleuves et leurs lacs, des montagnes, des volcans, etc. Ces divers éléments se sont déplacés ; mais nous n'avons pas la preuve que leur importance relative ait évolué. Tout au plus croyons-nous soupçonner (et c'est là de la tectonique) une accentuation des reliefs terrestres avec le temps. Le simple déplacement des mers à la surface nous intéresse assurément par lui-même, mais surtout dans la mesure où nous pouvons espérer en déterminer la loi. Nous sommes

1. *La Géologie de la France* (1921, Armand Colin).

2. Voir un résumé de ce genre dans la *Science Géologique*, p. 485 à 532, où l'on trouvera également, p. 222 bis, un tableau général des étages géologiques, que je suppose connus.

ainsi amenés à rechercher les contrastes des diverses périodes géologiques en négligeant leurs ressemblances.

A cet égard, il est une première apparence qu'il convient d'éliminer, si frappante qu'elle soit : c'est la différence générale d'aspect que présente habituellement en France un terrain tertiaire, aux couches très variées et souvent meubles, avec les grandes épaisseurs continues des calcaires secondaires et les facies généralement cristallins, les couleurs sombres des terrains primaires, beaucoup plus durs, plus consistants et soudés par le métamorphisme. Ces différences ne tiennent pas à une évolution comme celle dont nous cherchons à surprendre les effets, mais aux conditions dans lesquelles nous observons ces différents étages et aux modifications qui, pour eux, résultent simplement du temps écoulé depuis leur dépôt.

Tout d'abord, et c'est le fait le plus net, plus un terrain est ancien, plus il a eu des chances de subir cette recristallisation qui s'opère même à la surface, mais qui s'accroît avec le retour en profondeur. Il suffit, pour s'en rendre compte, d'aller étudier les terrains primaires dans les régions boréales où, comme nous le verrons, ils ont échappé aux plissements. Ils y ont, en même temps, évité le métamorphisme et c'est, pour un géologue européen, un spectacle surprenant que celui de couches siluriennes ou carbonifères restées horizontales et meubles, avec leurs fossiles intacts. Mais, d'autre part, il est logique de prévoir que les mers se sont moins déplacées depuis le début du tertiaire que depuis le dévonien ou le carbonifère. On doit donc, en principe, avoir une prédominance d'autant plus accentuée de facies littoraux ayant exigé pour émerger un déplacement restreint, que l'étage considéré est plus jeune. Ainsi, les représentants franchement marins du pliocène sont assez rares

sur nos continents, et cela non seulement en Europe, mais dans le monde entier. En revanche, on constate qu'à la même époque et dès le début du néogène, les quatre grands Océans actuels avaient déjà leur individualité, sauf à supposer une traînée d'îles aujourd'hui disparues entre le Spitzberg et le Groenland, ou entre la région méditerranéenne et les Antilles.

Quand on se borne à la géologie européenne et, plus spécialement, à la géologie de l'Europe occidentale, comme on l'a fait pendant la première partie du XIX^e siècle, on est tenté d'aller plus loin et d'admettre une loi de transformation progressive dans le régime moyen des mers : loi dont on trouverait aisément des explications si elle était bien démontrée. C'est ainsi que l'on insistait autrefois sur le caractère schisto-gréseux des dépôts cambriens et ordoviciens comme impliquant des côtes surbaissées et mal fixées, avec empiètements fréquents de la mer, ou sur la généralité de la transgression marine à l'époque cénomaniennne. On connaît aujourd'hui les vastes étendues de calcaires ordoviciens dans l'Amérique du Nord et l'émergence qui a marqué le cénomaniennne dans la région alpestre, dans la Scandinavie, la Russie du Nord, la Sibérie et la Chine. On se trouve ainsi mis en garde contre des généralisations prématurées. Cependant, si on reste dans les très grandes lignes, il semble bien que l'abondance des dépôts calcaires, par lesquels se manifeste en général une certaine profondeur des mers, s'est accentuée du primaire au secondaire, pour décroître ensuite. On pourrait l'expliquer en disant que les profondeurs marines se sont accrues avec le temps, leur étendue devenant moindre, mais qu'à partir du tertiaire, la place de ces grandes mers a commencé à se fixer, en sorte que leurs dépôts profonds ont plus rarement émergé.

On peut encore observer, dans le même ordre d'idées très général, une sorte de cycle sédimentaire qui justifie les deux grandes divisions du secondaire en les assimilant l'une à l'autre. Ainsi, en France, le jurassique commence souvent par des dépôts littoraux et terrigènes, qui continuent directement les facies habituels de notre trias et de notre permien. Puis la mer s'aprofondit vers le milieu du jurassique pour se réduire et s'éloigner à la fin du crétacé. C'est le même état de marée basse qui caractérise le début du crétacé. Vers le milieu du crétacé, la marée monte et une nouvelle transgression augmente la profondeur des mers, qui, dans le Nord de la France, diminue de nouveau en moyenne à la fin du crétacé. Il ne s'agit là, bien entendu, que d'un phénomène local, ayant sa contrepartie ailleurs. Mais il est nettement marqué et accompagné de modifications paléontologiques connexes.

Ces deux répétitions d'un même cycle s'intercalent entre les deux grands plissements orogéniques, qui caractérisent, d'autre part, le modelé de notre France et avec lesquels ils sont en relation. Si les faits nous étaient mieux connus, on ne pourrait manquer de voir que chaque modification sédimentaire est toujours le résultat d'un mouvement tectonique ayant une origine interne et que le changement de la faune est connexe : soit parce que les conditions de vie modifiées provoquent réellement, avec une allure qu'on a comparée à une explosion, l'apparition d'espèces nouvelles ; soit parce que des courants nouvellement établis amènent brusquement des espèces évoluées ailleurs avec plus de continuité et dont l'arrivée seule est une surprise. Nous voyons ainsi intervenir déjà l'influence tectonique, sur laquelle nous voulons surtout insister.

En effet, la connaissance minutieuse de la série stratigraphique, pour laquelle nous nous bornons à ces quelques

mots, est la base nécessaire et solide de toute géologie. Mais, bien plus que son allure normale, ses lacunes, ses anomalies, ses déformations sont instructives. Il en est de cette étude comme de ces sciences bio-psychologiques, où l'on examine avec un soin particulier les déviations malades pour y voir se développer des germes qui demeureraient latents et inaperçus dans l'état de santé.

Parmi ces déformations, les plissements montagneux sont le cas compliqué ; les émerSIONS, suivies ou non de transgressions, le cas simple. Tout d'abord, les deux phénomènes paraissent mettre en jeu un mécanisme très différent ; cette différence s'atténue lorsqu'on les scrute et les déplacements de la mer n'ont probablement pas une autre origine que les plissements montagneux : à savoir la plasticité de l'écorce, résultant d'un échauffement interne, mise en évidence par une compression latérale et traduite en plissements plus ou moins serrés, avec plus ou moins d'intensité. Les cas mêmes d'affaissement par failles peuvent à la rigueur se ramener à des plis dits « monoclinaux », dans lesquels une zone, devenue verticale, a pu être étirée et éliminée. Ils en seraient l'exagération.

Les déplacements des mers, ainsi reliés aux plissements, peuvent se prolonger plus qu'eux, par une sorte d'écho posthume. Mais ils s'atténuent peu à peu. Tant que le sol n'est pas fixé, il subit des transgressions et des émerSIONS. Quand il est devenu stable, le rivage des mers s'y déplace moins. Analysons le mécanisme de ces phénomènes.

Pourquoi y a-t-il transgression ? Parce que le niveau relatif du continent s'abaisse par rapport à celui de la mer. Mais, d'une manière absolue, la mer peut monter ou le continent s'affaisser. Une élévation de la mer pourrait elle-même tenir à une augmentation générale de son volume, ou

à une variation dans les attractions qui s'exercent sur elle, à une marée, et alors elle n'aurait plus rien de tectonique. On s'est maintes fois demandé si les grands balancements des mers, qui les ont tour à tour reportées d'un continent à l'autre, n'avaient pas pu avoir pour cause une influence astronomique, accusant elle-même une certaine périodicité, ou encore un changement dans la vitesse de rotation terrestre. Mais rien de semblable n'a pu être démontré et ces déplacements constituent, le plus souvent, des incidents locaux, pour lesquels on a été beaucoup plus naturellement amené à supposer un affaissement ou un exhaussement du sol, entraînant un appel ou un retrait des eaux et, par conséquent, un mouvement inverse ailleurs.

L'affaissement d'un continent, qui y provoque une transgression, a souvent été considéré ainsi comme la descente en bloc d'un compartiment qui aurait laissé subsister le relief des terres voisines. C'est l'idée dont la traduction mécanique est la descente par failles. Les failles de très grandes dimensions sont un fait d'observation, sauf que nous ignorons complètement si cette descente a été brusque ou lente. Mais, surtout lorsqu'on remonte dans l'histoire géologique, leur rôle semble restreint et a eu plutôt pour résultat la formation localisée de vallées, de lacs, ou de fosses dans une mer préexistante que de larges transgressions proprement dites. On ne se représente pas l'effondrement d'un grand continent envahi par la mer sans un abaissement général du niveau des eaux, ayant dû avoir pour résultat, pour contrepartie, l'émersion non constatée de vastes terres fermes. Il semble bien que la production de rivages par affaissement vertical à bords rectilignes coupant à l'emporte-pièce les terrains préexistants, l'affaissement dont la côte européenne de l'Atlantique, la Mer Rouge ou la Mer Égée

nous paraissent représenter les types les plus caractéristiques, soit exceptionnel et n'ait que récemment pris part aux grandes dénivellations. Une faille, ou plutôt le système d'accidents mécaniques dont la faille n'est qu'un trait particulier, représente un cas de rupture dans un ensemble soumis à des flexions. Pour la plupart des transgressions anciennes, nous avons l'impression d'un simple gauchissement en rapport avec l'élasticité de l'écorce. L'émergence ou la transgression seraient ainsi des épisodes d'un plissement, qui tantôt déterminerait une saillie, et tantôt un creux.

On est, en résumé, conduit à se représenter la plupart des transgressions comme des phénomènes progressifs, dans lesquels aurait pu se réaliser ce que l'on a appelé une abrasion marine : l'aplanissement du continent par le progrès même de la marée avant son envahissement complet par la mer. Quand on examine en France le retour des mers jurassiques et crétacées, on croit parfois apercevoir que l'invasion marine s'est faite doucement sur un sol déjà nivelé. Mais ce nivellement était très relatif, comme suffiraient à le montrer les études particulièrement précises que l'on a pu faire sur la base du crétacé superposé aux terrains primaires dans notre région houillère du Nord.

Où se sont produites ces transgressions ? Dans les régions que leur plasticité propre rendait les plus aptes à fléchir. L'observation la plus simple, soit de la géologie régionale, soit des séismes, montre que les masses continentales sont et ont toujours été très inégalement stables et nous citerons, tout à l'heure, comme exemple de masses particulièrement consolidées, les plateformes boréales du Canada ou de la Sibérie. Ici, les déplacements de la mer ont dû se réduire au minimum. Sur ces plateformes, les terrains archéens manifestent seuls des plissements analogues à ceux dont nous

retrouvons, dans les Alpes, l'empreinte jusque sur les dépôts tertiaires. Au-dessus d'eux, on ne trouve qu'une faible épaisseur de sédiments primaires horizontaux, peu surélevés par rapport à la mer, et point de secondaire ni de tertiaire. On en conclut que ces massifs sont émergés depuis la fin du primaire ; que, même pendant le primaire, ils n'ont accusé qu'un affaissement, puis une émergence, réduite à quelques centaines de mètres et, par conséquent, que le niveau des mers y a peu changé au cours des périodes géologiques.

La conclusion, comme toutes celles qui se rapportent aux masses continentales, est beaucoup moins certaine qu'elle ne semble d'abord. Les sédiments que nous voyons sur un continent ne sont, en effet, que des épaves épargnées par l'érosion de ceux qui ont pu y exister auparavant et cela est particulièrement vrai lorsque ces sédiments, restés horizontaux, n'ont pas été emprisonnés dans des terrains anciens plus durs et protégés ainsi par leur plissement même. Le sol du Canada pourrait avoir supporté des kilomètres de terrains primaires et, par conséquent, s'être relevé de plusieurs kilomètres que nous n'en saurions rien. Nous ignorons également s'il n'a pas été, pendant le secondaire ou le tertiaire, beaucoup plus saillant qu'aujourd'hui. Cependant, en restant dans les probabilités, on peut logiquement supposer que ces pays n'ont pas été submergés depuis le primaire et, par conséquent, que, s'ils ont subi un affaissement momentané, cet affaissement a toujours été inférieur à leur exhaussement.

Par contre, dans une région comme le Bassin de Paris, toute une série stratigraphique secondaire et tertiaire se superpose au primaire plissé. La mer a donc séjourné ici pendant de longues périodes, mais non à beaucoup près d'une façon continue, et la stratigraphie locale permet de

suivre des mouvements oscillatoires, dont le dernier a eu pour effet de faire émerger tous ces sédiments marins comme nous le voyons aujourd'hui. En même temps, ces terrains ont été plissés, ou tout au moins gauchis, accusant ainsi, sur cet exemple particulier, les rapports signalés plus haut entre les déplacements marins et les mouvements orogéniques.

II. LES CHAINES HERCYNIENNE ET ALPESTRE EN FRANCE

Nous voudrions, dans un paragraphe ultérieur, examiner comment les plissements se sont déplacés ou localisés sur la surface de la Terre. Pour ne pas raisonner dans le vide, le mieux est de commencer par étudier, dans un cas particulièrement bien connu, comment se sont comportés les deux grands plissements successifs, auxquels est particulièrement due l'orographie du sol français. Le premier de ces plissements, dit hercynien, s'est produit pendant le carbonifère ; le second, dit alp-himalayen, pendant le tertiaire. Laissons de côté les plissements antérieurs, pour lesquels il nous faudrait aller chercher notre principale documentation dans des régions plus septentrionales, au nord du Canada, en Écosse, en Scandinavie, en Finlande ou en Sibérie. Mieux vaudrait nous étendre avec plus de détails sur deux formations particulièrement caractéristiques¹.

Nous pouvons commencer l'histoire de la chaîne hercynienne française avec le début du carbonifère. Auparavant, je viens de le rappeler, il avait déjà existé d'autres plisse-

1. Voir, pour les détails, la *Géologie de la France*. On trouvera l'explication des principaux termes géologiques dans le dictionnaire annexé à ma *Géologie pratique*.

ments, dont le dernier, dit calédonien et datant du silurien, particulièrement marqué dans le Nord de l'Europe, a laissé son empreinte très nette en France, notamment en Bretagne. Mais cette chaîne, une fois formée, avait été, suivant la loi d'érosion habituelle, peu à peu aplanie en une pénéplaine et même assez affaissée pour permettre un retour de la mer sur sa bordure méridionale. Pendant la seconde moitié du dévonien, l'Écosse et la Scandinavie, qui semblent avoir constitué précédemment l'axe de la chaîne calédonienne, paraissent être restés émergées. Mais, plus au sud, la mer recouvre des espaces où les plissements calédoniens s'étaient fait également sentir, plus atténués : une partie de la Bretagne et du Massif Central, l'Ardenne et les Vosges. N'oublions pas que la place attribuée à la mer sur les cartes paléogéographiques est nécessairement un minimum, puisqu'un terrain marin peut avoir existé sans que nous constations aujourd'hui sa présence et retenons cette allure du sol post-calédonien que nous allons voir se reproduire, avec un déplacement vers le sud, pendant la période consécutive aux plissements hercyniens.

A cette époque dévonienne, le nord de la Grande-Bretagne et la Scandinavie forment une région continentale avec dépressions remplies d'eau douce, comme cela se produira pour la France centrale à la fin du carbonifère : dans les deux cas sur l'emplacement de la principale chaîne plissée qui n'est pas encore aplanie. La rencontre de végétaux terrestres, de poissons d'eau douce, d'insectes ailés accuse ce caractère continental et constitue un autre rapprochement avec ce que nous observerons dans notre houiller du Massif Central. Le vieux grès rouge, épais de 600 mètres, qui représente le dévonien supérieur en Écosse, constitue un épisode identique à celui du grès rouge permien en France, en Saxe

et dans l'Oural. Plus au sud, une zone littorale dévonienne, dont les rivages ont subi des déplacements fréquents, englobe le sud de l'Angleterre, le Boulonnais, l'Ardenne, l'Eifel et le Bassin de la Ruhr. Enfin, si l'on avance encore au Midi, on rencontre des calcaires franchement marins (boues à ptéropodes, calcaires à ammonoidés), à l'est de la Bretagne, au nord du Massif Central, dans la vallée de la Lahn et dans le Harz. Des récifs coralliens apparaissent en Bretagne, dans les Vosges et dans l'Allier. Peut-être le Massif Central forme-t-il une île, comme on l'admet d'ordinaire ; mais ce massif est, en tout cas, baigné au sud par la mer.

La période carbonifère, qui succède, est divisée en trois sous-étages, auxquels nous laisserons leurs noms tirés de la région française sans recourir à d'autres dénominations plus correctes, qui ont l'avantage théorique mais aussi l'inconvénient pour notre sujet d'être empruntées à la région russe, où, le plissement ne s'étant pas fait sentir, la série est restée franchement marine. Nous parlerons donc du *Dinantien* (Dinant-sur-Meuse), du *Westphalien* (Westphalie), du *Stéphanien* (Saint-Étienne).

Pendant le dinantien, les conditions du supra-dévonien se continuent en grande partie. Cependant on voit se développer, dans le Massif Central, dans le Morvan, dans les Vosges, des phénomènes volcaniques d'une grande intensité, des pluies de cendres qui forment d'épais bancs de tufs, de véritables volcans dans la Creuse, etc. Cette zone, que nous allons voir bientôt surgir en une chaîne montagneuse, est donc devenue instable, soumise à des dislocations et, par assimilation, nous pouvons la supposer alors secouée par des séismes. Elle tend à émerger et cette émergence correspond avec ce qui se passe au même moment dans toutes les régions

destinées à être affectées par les principales saillies hercyniennes, dans la plus grande partie de l'Europe Centrale, dans les Appalaches, dans l'Oural, tandis qu'ailleurs il existe, au même moment, de vastes mers tranquilles aux États-Unis et en Russie. De toutes parts, dans l'Europe Occidentale, surgissent des îles et s'isolent des lagunes parallèles à la direction générale des plis, dans lesquelles les végétaux commencent à former de la houille (importants terrains charbonneux et schistes bitumineux d'Écosse, Basse-Loire, Creuse, région de Moscou, Altaï, etc.).

A vrai dire, pendant le dinantien, le plissement hercynien est déjà commencé en profondeur ; mais il ne se manifeste pas encore violemment à la superficie. Il présente déjà ses principaux caractères géographiques. Ainsi la région du Massif Central, où il atteindra son paroxysme, offre, nous venons de le dire, quelques-uns des caractères propres à la formation houillère de l'époque suivante. Au contraire, plus au Nord, sur l'emplacement du Bassin Franco-Belge, où, pendant le westphalien, on restera au niveau de la mer, ou encore dans les Bassins de Cardiff, Newcastle, etc., qui présenteront les mêmes caractères, on a des dépôts dinantiens de pleine mer avec des récifs de coraux, comme ceux de Dinant sur Meuse qui ont donné son nom à l'étage, ou comme ceux de la chaîne Pennine anglaise, appelés les « Calcaires de montagnes ». Vers l'est, en Silésie, une formation détritique, atteignant 14 kilomètres d'épaisseur, met en évidence un de ces affaissements progressifs, prélude fréquent des chaînes montagneuses, qui caractérisent les zones géo-synclinales. J'ai comparé ailleurs l'aspect que pouvait présenter alors la géographie européenne à celui qu'offrent aujourd'hui la chaîne volcanique des Indes hollandaises, des Philippines et du Japon, avec ses multitudes d'îles

dessinant des chaînes en partie sous-marines, sa végétation intense dans le climat humide et chaud des tropiques, ses constructions de coraux et ses volcans. On peut se demander si la concomitance d'un volcanisme particulièrement actif avec les dépôts charbonneux, qui s'est reproduite pour les lignites à la fin du créacé dans l'ouest américain et en Europe pendant le tertiaire, ne tient pas à ce que ce volcanisme a mis en circulation dans l'air de grandes quantités d'acide carbonique. On sait combien la teneur en acide carbonique influe directement, même par de très faibles variations, sur le climat et sur le développement des végétaux.

Avec le westphalien, le soulèvement s'accroît et l'effet du plissement se traduit par une saillie montagneuse, dont l'axe correspond à peu près au Massif Central. En conséquence, dans ce massif, les dépôts westphaliens font entièrement défaut. Les éboulis ou les alluvions fluviales, qui ont pu s'y former alors, ont disparu. Dans les Alpes, un régime montagneux produit des dépôts torrentiels à éléments volumineux. En revanche, quand on s'éloigne, soit vers le nord, soit vers le sud, on voit les cimes disparaître et le sol se rapprocher peu à peu du niveau de la mer. La transition de l'un à l'autre aspect est bien marquée : au Nord, dans le Bassin de la Sarre ; au Sud, vers le Bassin du Gard, qui marquent, d'un côté et de l'autre, les limites de la chaîne principale. Dans la Sarre, un synclinal, formé de terrains replissés à la fin du dinantien, reçoit une épaisse série stratigraphique continue et concordante, série sans couches marines qui comprend du westphalien, du stéphanien et du permien et qui accuse, par conséquent, l'affaissement lent d'un sillon lacustre, par un phénomène analogue à ceux que nous avons déjà eu l'occasion de signaler en Silésie, ou, précédemment, dans le Gondwana et le Karoo. Dans le

Gard, où les apparences sont un peu compliquées par les charriages tertiaires, un épais conglomérat à blocs volumineux et peu roulés, renfermant des rognons d'antracite, supporte une puissante série stéphanienne continue, à couches de houille régulières, épaisse au moins de 3 kilomètres. C'est un autre exemple de synclinal ayant commencé à s'accuser vers la fin du westphalien et s'étant peu à peu approfondi. Dans ce sens du Sud, on retrouve la mer libre en atteignant la zone des Asturies, du Piémont et de la Carinthie.

Si nous continuons au contraire vers le nord, nous arrivons également à la mer en abordant une longue dépression lagunaire qui relie les bassins charbonneux de Cardiff, de Douvres, du Bassin Franco-Belge, d'Eschweiler, de la Ruhr, de la Saxe, de la Silésie et du Donetz, et qui débouche là dans la mer libre. Partout, le long de cette lagune à la direction si nettement marquée, on retrouve alors les mêmes caractères géographiques : des marais périodiquement envahis par les eaux marines et encombrés par les végétaux qu'y apportent des cours d'eau descendant directement des crêtes voisines. Évidemment, un mouvement continu de l'écorce se traduit ici par l'apparition progressive de rides qui sont immédiatement rongées par les eaux et démantelées en formations gréseuses ou schisteuses, par la production de sillons qui s'approfondissent au fur et à mesure de la sédimentation. Il semble que nous assistions à un violent mouvement de compression latérale dans le sens nord-sud, ayant pour résultat le plissement des terrains à mesure qu'ils se forment, avec une tendance générale au renversement dans le sens du sud au nord, qui s'accroît à la fin de la période.

Le régime de ces lagunes se poursuit loin vers le nord

jusqu'en Écosse, rejoignant ainsi la principale zone affectée par les plis calédoniens antérieurs. Mais, plus on s'écarte vers le Nord, plus on voit l'intensité des plissements s'affaiblir et l'on arrive vite à une zone où l'ossature de la chaîne calédonienne paraît dès lors définitivement assise, où l'écorce a été assez consolidée par l'effet du plissement même pour que, désormais, elle ait perdu son élasticité et résiste à tous les efforts de plissement ultérieurs.

La fin du westphalien (carbonifère moyen) marque le moment où l'effort de plissement, avec les charriages connexes, atteint son maximum d'intensité. Nous voyons le fait avec une netteté particulière dans le Bassin Franco-Belge parce qu'il y a marqué à son tour la phase de la consolidation définitive, en sorte que tous ces terrains plissés et renversés nous ont été conservés à l'état de momies sous un précieux recouvrement de crétacé. Mais le phénomène n'a pas dû être moins accentué dans le Massif Central, où il a provoqué la formation de nombreuses dépressions lacustres destinées à être remplies pendant le stéphanien.

Quand commence le stéphanien, nous avons donc, depuis la Sarre jusqu'au Gard, une série de sillons grossièrement parallèles entre eux comme les vallées du Jura, tandis qu'au nord la région du Houiller Belge semble définitivement émergée, comme la plus grande partie de l'Europe. Quelques lacs à dépôts houillers s'espacent sur ce continent : vers le nord, à Littry en Normandie ; vers le sud, dans les Pyrénées à la Rhune, dans la province de Ciudad Real en Espagne, en Sardaigne, etc. Pour atteindre la mer libre, il faut aller au sud-ouest dans les Asturies, qui ressemblent alors à ce qu'était précédemment le Bassin Franco-Belge, ou vers le sud-est, en Méditerranée orientale et en Russie. L'émergence s'accroît donc, suite et prolongement des

grands plissements, qui tendent à se localiser sur l'emplacement actuel du Massif Central. Ils y produisent un resserrement des bassins avec plis multiples et ils y sont accompagnés de quelques manifestations volcaniques, traduites par les intrusions de roches, dites porphyrites, dans les couches houillères. Tous nos terrains houillers lacustres de la Bretagne, de la Vendée, du Massif Central et des Vosges sont alors plissés, en même temps que déposés. Leur largeur nous apparaît ainsi souvent réduite dans la proportion de 1 à 3. Mais les Bassins plus septentrionaux en Angleterre, ou même au nord de la Ruhr, échappent au plissement et, dans l'axe de la chaîne elle-même, plus on avance dans le temps, plus l'effort paraît se calmer et se localiser, pour s'arrêter enfin à peu près partout pendant le permien. Un déplacement général dans le sens du sud-est au nord-ouest fait que les remplissages charbonneux se transportent peu à peu de Saint-Étienne à Commentry et Decize, en obéissant au sens du ridement montagneux.

Quand on passe du carbonifère au permien, on constate que, dans tout l'axe de la chaîne, le remplissage des lacs est achevé. Ils ne reçoivent plus aucun apport et c'est, au contraire, leur destruction qui commence. Au nord et au sud de la chaîne, il se produit un affaissement progressif, qui n'a pas encore pour résultat de ramener le sol au-dessous de la mer, sauf à la hauteur des Vosges et des Pyrénées, mais qui l'a cependant suffisamment déprimé et aplani pour qu'il s'y forme d'épais dépôts tranquilles d'éléments terrigènes, de schistes, puis de grès contenant encore des organismes (houille ou schistes bitumineux). Beaucoup d'entre eux paraissent s'être formés sous un climat désertique, avec fréquentes concentrations salines assimilables à celles de la zone des Chotts tunisiens. Des grès rouges rappellent ce

que nous avons observé précédemment dans la dévonien de l'Écosse, à une époque correspondante par rapport aux plissements calédoniens. Des tronçons anciens de la zone affectée par les plis hercyniens s'enfoncent en forme de cuvettes comme le Bassin Parisien, tandis que d'autres restent plus stables, ou tendent peut-être même à se relever. Des volcans subsistent dans le Morvan et dans l'Estérel.

Puis, avec le trias, l'affaissement se continue dans les régions déjà déprimées pendant le permien. Au nord du Massif Central, il se propage peu à peu de l'est à l'ouest, comme si le Massif Central tournait autour d'une charnière située vers le Détroit de Poitiers. Ce Massif Central reste au-dessus de la mer, ainsi que les autres principaux tronçons actuellement saillants de la chaîne hercynienne française, la Bretagne, l'Ardenne ou les Vosges. Mais la marée gagne dans les compartiments intermédiaires et sur les bords du Massif Central, déposant une série de couches en transgression et en faible discordance les unes sur les autres, dont les affleurements successifs dessinent des biseaux à la pointe tournée vers l'ouest. Les caractères littoraux s'accusent en Lorraine. La mer s'étend de là sur toute l'Europe centrale, puis sur la Méditerranée triasique, la « Téthys », qui va des Alpes à l'Himalaya et au Tonkin.

Si l'on examine les cotes de fonds de nos bassins houillers, on est conduit à admettre ainsi, pendant le permien et le trias, un affaissement qui aurait atteint 5 kilomètres à Sarrebruck et 1 ou 2 kilomètres dans les Vosges. Désormais, le sol de la France est préparé pour les grandes transgressions tranquilles du jurassique ou du crétacé, qui n'épargneront plus que les saillies actuelles, citées plus haut, de la chaîne hercynienne, et qui recouvriront toutes ses zones latérales. En même temps, la consolidation est telle dans cet

axe de la chaîne qu'il ne se prêtera plus désormais à aucun plissement proprement dit : tout au plus à un gauchissement général, à un emboutissage en relief ou en creux comme ceux du Massif Central ou du Bassin Parisien, avec des décrochements par failles qui en accentueront les effets.

Après la période de calme qui marque en Europe le secondaire, le tertiaire va nous montrer un autre mouvement analogue, dont nous allons faire ressortir les analogies avec le précédent et, en même temps, la localisation dans une zone plus méridionale. On trouve des traces du mouvement hercynien sur la plus grande partie de la future chaîne alpestre, où leurs effets sont seulement parfois masqués par la superposition de mouvements ultérieurs. Ainsi, dans les Alpes françaises, le carbonifère commence par être souvent en discordance sur les schistes cristallins et supporte à son tour en discordance le permien. Dans les Alpes Carniques, on reconnaît un plissement westphalien et un plissement permien ; dans les Pyrénées, un mouvement westphalien, etc. Mais, par contre, nous allons voir tout l'axe de la chaîne hercynienne et tous ses prolongements septentrionaux dans le sens de l'axe calédonien échapper désormais aux plissements, qui y sont tout au plus remplacés par des effondrements et par des failles.

Les niveaux tertiaires ayant pu être subdivisés grâce à l'abondance de leurs fossiles, on peut raconter cette histoire de la chaîne Alp-Himalayenne (qui comprend les Pyrénées, les Apennins, le Carpathes et le Caucase) avec quelques précision¹.

Au début du tertiaire, aucune saillie n'existe dans les pays qui vont devenir montagneux. Au contraire, deux

1. Les numéros accolés plus loin à chaque nom d'étage caractérisent sa place dans la série stratigraphique.

sillons marins, jouant le rôle de géo-synclinaux, s'allongent le long des Pyrénées et des Alpes. C'est alors que vont surgir successivement les Pyrénées, les Alpes et les Dinarides.

La période dite sparnacienne (42) est celle où le ridement des terrains antérieurs commence dans l'Est des Pyrénées. Le phénomène se répercute au loin vers le Nord, à travers toute la France, dans le Bassin de la Loire et jusqu'à la Manche, sous la forme de ravinements torrentiels extrêmement intenses qui correspondent apparemment à une accentuation générale du relief. L'effort de compression venu des Pyrénées se propage ainsi suivant sa direction habituelle du sud au nord. Dans les Causses, dans le Quercy commencent à se creuser les grottes, avens, canons de rivières, poches à phosphorites, etc., qui donnent à toute cette région un aspect si particulier. Néanmoins, la mer à nummulites lutétienne (44) s'étend encore entre Biarritz et la Montagne Noire, comme dans le Nord de l'Espagne.

Dans les Pyrénées mêmes, il se produit évidemment une première saillie du sol ; car cette saillie subit la destruction habituelle des chaînes naissantes en gros blocs torrentiels. Les poudingues s'accumulent à Palassou, au Mont-Serrat (44, 45), etc. (dans le cas du Mont-Serrat, avec des intercalations marines qui montrent l'approfondissement progressif d'un rivage). Vers l'est, une crête, aujourd'hui submergée, tend à relier les Pyrénées avec la Provence. Vers l'ouest, la mer subsiste plus longtemps. Mais, dans l'ensemble, si les plissements de cette époque sont manifestes, on n'a pas le droit d'en conclure nécessairement que l'orographie actuelle en soit la conséquence immédiate. Nous serions plutôt porté à croire que le plissement a dû commencer alors par être en grande partie souterrain pour ne former la chaîne saillante qu'un peu plus tard.

Pendant la période suivante (46), le calme paraît un moment s'établir le long de cette première ride pyrénéenne, avec un régime souvent lacustre, tandis que, sur l'emplacement futur des Alpes, des terrains détritiques d'une épaisseur considérable, grès micacés à débris de plantes et schistes du flysch (45, 46), accusent l'enfoncement progressif d'une zone synclinale, tel que nous l'avons déjà maintes fois rencontré.

Avec l'oligocène commence alors un nouvel effort orogénique, dont l'axe est cette fois dans les Alpes mêmes, mais dont les Pyrénées et les tronçons de l'ancienne chaîne hercynienne vont, sous des formes diverses, subir le contre-coup.

Dans les Alpes, cela débute, comme d'habitude, par des conglomérats. C'est la première phase ordinaire, où les saillies naissantes sont immédiatement détruites par de puissants ravinements torrentiels avant d'avoir pu s'élever notablement au-dessus de la mer. L'épaisseur que prennent chaque fois ces conglomérats montre qu'il y a affaissement progressif de la zone qui se détruit. Ces poudingues des Alpes apparaissent dès le début de l'aquitainien, se développent dans le burdigalien (48) au Righi et surtout dans l'helvétien (nagelfluh, 50). Ils représentent le pendant des poudingues plus anciens de Palassou et du Mont-Serrat pour les Pyrénées, ou de ceux qui abondent dans le stéphanien du Massif Central. Mais, de même que nous avons, au Nord des Pyrénées, des dépôts lagunaires oligocènes (46), de même nous rencontrons, au Nord des Alpes, les gypses du sarmatien (52). La surrection montagnaise reste localisée.

Cependant vers le nord, la compression qui se propage dans l'ancienne chaîne hercynienne, ne pouvant plus y produire des plissements par suite de la solidification accomplie,

y provoque des cassures, des effondrements comme ceux de la Limagne, de la vallée du Cher (sannoisien, 46, et surtout stampien, 49). Entre les Vosges et la Forêt Noire, jusque là réunies, l'effondrement de la vallée du Rhin se remplit de dépôts sannoisiens (36) avec pétrole, sel et potasse. En Bretagne même, quelques failles montrent la prolongation, en même temps que les limites du mouvement. Dans le Bassin de Paris, d'énormes dépôts de sables appartiennent : au burdigalien (47) dans l'Orléanais ; à l'helvétien (50) en Sologne. Ils montrent un ruissellement extraordinairement intense, analogue à celui qui avait marqué le sparnacien et correspondent probablement, comme ceux de cette époque, à une émergence de la France méridionale et sud-orientale, en même temps qu'à un régime de pluies ou de débâcles glaciaires. Les terrains secondaires du Bassin Parisien subissent de faibles plissements. Dans les Pyrénées, les couches récemment déposées se plissent et se redressent. C'est peut-être le moment où la chaîne y atteint son maximum de hauteur.

Pendant la même période (50, 51), la région des Apennins et des Carpathes, où seront bientôt les Dinarides, prend l'aspect d'un sillon en voie d'affaissement, où s'accumulent les dépôts grésos-schisteux du « Schlier », analogues au flysch (45, 46) de la zone alpestre proprement dite.

Le phénomène de la surrection alpestre a pu s'accroître avec la fin du miocène (51, 52, 53) et le début du pliocène (54). La poussée des Dinarides plus méridionales s'écrase avec une intensité croissante sur la chaîne alpestre, pour laquelle elle a joué le rôle de « traineau écraseur ». A ce moment, il y a, dans les Alpes, recrudescence de la destruction torrentielle, conglomérats du Piémont et de Suisse, cailloutis de Digne. Vers le nord, les grandes nappes d'eau ruisselantes font place à des rivières mieux délimitées et plus

profondes, qui souvent se présentent à nous comme les ancêtres géants de nos rivières actuelles. Les volcans abondent sur les cassures de la chaîne hercynienne formant « Avant-Pays », dans le Massif Central, l'Eifel, etc., ou sur le pourtour d'ovales effondrées dans la chaîne même. De derniers plissements très localisés affectent encore le pontien (53) des Basses-Alpes et la chaîne s'établit avec une hauteur qui pouvait atteindre alors 8 à 9 kilomètres au-dessus de la mer.

Finalement, le pliocène (54 à 56) et le pléistocène (57 à 60) dans lequel nous vivons, représentent un commencement de destruction, d'aplanissement par érosion, plus avancé dans les Pyrénées que dans les Alpes parce qu'elles sont plus vieilles, mais encore incomplet. C'est ainsi que toutes les chaînes appartenant à cette phase tertiaire de plissement constituent les seules montagnes réellement saillantes de notre globe, l'Himalaya ou le Caucase comme les Andes. L'homme est apparu dans la phase consécutive à ce plissement, alors que le sol était généralement à peu près stabilisé, que les rivières avaient adopté un lit plus restreint avec une pente correspondant à un profil d'équilibre, que la plupart des volcans s'étaient éteints et que l'atmosphère, probablement surchargée auparavant d'acide carbonique par les fumerolles volcaniques, avait été une fois de plus purifiée par les plantes.

III. L'ÉVOLUTION DES ZONES OROGÉNIQUES

Ce que nous venons de dire sur les deux dernières périodes de plissement en nous bornant à la région française, suffit à faire comprendre l'allure du phénomène. En résumé, nous

avons vu le mouvement hercynien durer depuis le début du carbonifère jusqu'à la fin du permien en affectant une zone étendue qui, partant au Nord de l'Angleterre, dépasse au Sud les Pyrénées et les Alpes, empiétant certainement sur la Méditerranée, s'il ne l'a pas affectée toute entière. L'axe de ce mouvement passe par le Massif Central. Toutes les régions septentrionales de l'Europe en sont indemnes, comme elles échapperont plus tard aux mouvements alpins. Le phénomène commence par l'établissement d'un sillon marin géo-synclinal, se continue par la saillie d'une chaîne détruite au fur et à mesure en conglomérats, aboutit par une série de plissements à une surrection montagneuse avec des lacs, des volcans et peut-être des glaciers, se termine enfin par l'érosion progressive de la chaîne, bientôt si complète et suivie d'un affaissement assez sensible pour que la mer vienne occuper une grande partie de la zone plissée hercynienne.

De même, à l'époque tertiaire, nous assistons plus en détail à la production de trois rides successives, reproduisant chacune pour son compte les phases précédentes. Pendant tout le tertiaire, un effort de compression, aboutissant aussi à des charriages et à une saillie montagneuse, s'exerce dans le sens du sud au nord. La région que nous considérons tout à l'heure comme l'axe du plissement hercynien échappe à cet effort sous la forme de plissements ; mais elle subit des effondrements linéaires, des ouvertures d'événements volcaniques et un gauchissement à grande envergure, qui arrive à déterminer de faibles plis posthumes dans les sédiments encore élastiques comme ceux du Bassin de Paris, superposés à un substratum solide, pour lequel il est possible que la même compression aboutisse à des ruptures.

Des études de ce genre poursuivies sur l'ensemble du

globe aboutissent à faire penser qu'en Europe les premiers plissements ont été extrêmement généraux, l'écorce étant alors toute entière flexible ; après quoi, épargnant la région boréale, ils se sont peu à peu localisés dans une zone de plus en plus restreinte, qui aujourd'hui est réduite à la Méditerranée.

Si l'on considère l'ensemble de notre hémisphère, on trouve, autour du Pôle Nord, trois grands massifs de très ancienne consolidation, trois plateformes, môles ou boucliers, représentant la Scandinavie et la Finlande, la Sibérie, le Canada et le Groenland. Dans ces massifs on constate semblablement qu'aucun plissement orogénique ne s'est produit depuis le début des terrains datés par leurs fossiles. Tous les terrains ultérieurs, qui y subsistent par tronçons en couches horizontales, correspondent à des déplacements verticaux du sol, à des affaissements suivis de surrections et effectués en bloc, sans action mécanique notable sur les sédiments. Ce sont là des restes disjoints d'une première chaîne huronienne, qui fut d'abord continue mais qui, postérieurement, a subi des dislocations par failles, analogues à celles que nous venons de rencontrer dans les massifs hercyniens à l'époque tertiaire. Tandis que les plissements huroniens, comme les plis postérieurs, dessinent en général des guirlandes plus ou moins sinueuses autour du pôle, les dislocations plus récentes accusent une tendance méridienne, dont l'âge exact n'est pas toujours connu, mais qui, en tout cas, s'est accentuée pendant le tertiaire : cassure Nord-Atlantique passant par Jean-Mayen et par l'Islande, fosse du détroit de Davis, zone ultérieurement affectée par les plis hercyniens de la Novaia Zemlia et de l'Oural.

Puis vient, après un ridement calédonien d'importance et d'extension plus restreintes, la chaîne hercynienne, dont

nous venons d'examiner une zone française. Vers l'Est, cette zone se prolonge dans la Russie Méridionale, l'Oural, l'Altai et le Kighan. Elle lance un branchement méridional vers l'Indo-Chine et Malacca. On la retrouve aux États-Unis, sur la périphérie du Bouclier Canadien et dans les Appalaches.

Enfin, la chaîne Alp-Himalayenne se localise dans une zone étroite, qui, en Europe, embrasse les deux rives de la Méditerranée. Après quoi, par le Caucase et les Taurides, elle va rejoindre les arcs de l'Iran et du Pamir. Elle accumule les plissements et les saillies dans le Tien-Chan, le Kouen-Lun et l'Himalaya et, par le Nan-Chan, atteint le Pacifique. Elle occupe les deux rives de ce dernier océan et trace, autour de lui, par la traînée de ses volcans, un cercle de feu. On la retrouve dans l'Amérique Centrale et les Antilles.

C'est la dernière zone fragile de la Terre, dont nous allons, dans le chapitre suivant, étudier les convulsions.

BIBLIOGRAPHIE

1906. A. DE LAPPARENT. *Traité de Géologie*. 5^e édition. (Masson);
1907. L. DE LAUNAY. *L'Histoire de la Terre*. (Flammarion).
1907. E. HAUG. *Traité de Géologie*. (Armand Colin.)
1897-1918. SUESS. *La Face de la Terre*. (Armand Colin.)
1921. L. DE LAUNAY. *La Géologie de la France*. (Armand Colin.)
1922. L. DE LAUNAY. *La Science Géologique*. 3^e édition. (Armand Colin.)

CHAPITRE VI

LES DERNIÈRES CONVULSIONS. TREMBLEMENTS DE TERRE ET VOLCANS

I. DÉPLACEMENTS LENTS DU SOL

Nous avons vu peu à peu les plissements orogéniques se localiser sur des zones de plus en plus étroites, dont la principale en Europe est la région méditerranéenne, tandis qu'ailleurs les mouvements se réduisaient à des déplacements verticaux de moindre amplitude, coupés par des effondrements. Il n'y a aucune raison pour que ce état de choses soit terminé et, fréquemment, la Terre vient rappeler aux plus ignorants, par ses tremblements ou par ses éruptions, qu'il existe une Géologie. Les hommes modernes en ont même la sensation de plus en plus fréquente, simplement parce que les moyens de communication deviennent de plus en plus rapides, parce que le globe se raccornit de jour en jour pour la curiosité humaine avec une rapidité qui défie de loin les progrès de la contraction interne. Mais, en dehors de ces phénomènes retentissants que nous étudierons bientôt, la Terre subit également des déformations lentes, beaucoup plus générales et non moins instructives.

Ces mouvements qualifiés de lents, qui n'excluent pas des tassements intermittents et plus brusques, se traduisent de

tous côtés par des déplacements de rivages. On constate fréquemment, sur les côtes, que le niveau de la mer s'est élevé ou abaissé. Par exemple, le long de l'Atlantique septentrionale que nous considérons comme le produit d'un effondrement récent, les constatations sont des plus nettes. Il suffit de citer les fiords de Norvège, où l'on observe, à des altitudes diverses, d'anciennes plages, tandis que le creusement, aujourd'hui sous-marin, de ces vallées englouties, paraît s'être d'abord effectué par des glaciers. Le sol s'est donc un moment abaissé, puis relevé par saccades. Des rochers percés par les vagues et aujourd'hui situés à plusieurs mètres au-dessus des flots confirment le même relèvement qui se continue. On trouve, par contre, des preuves d'affaissement en France, et en Espagne, telles que la fameuse ville d'Ys, sans parler de la légende probablement exacte relative à la disparition de l'Atlantide. Beaucoup de rivières qui se jettent dans l'Atlantique se continuent par une vallée sous-marine. Toutes nos côtes de la Manche s'affaissent et l'on y trouve, à plusieurs mètres au-dessous du niveau des plus basses mers, des troncs d'arbres en place, des silex polis ou des poteries¹. Dans la Méditerranée, une émergence est accusée par une série de terrasses marines étagées. Dans le Pacifique, les faits de ce genre sont également nombreux : accroissement des récifs coralliens, routes aboutissant aujourd'hui à la mer, etc. Suivant les points, ces mouvements peuvent être de sens contraire et, indépendamment de leur caractère proprement local, on conçoit d'ailleurs que toute émergence doive avoir ailleurs sa contrepartie nécessaire par une submersion.

1. Voir, dans la *Géologie de la France*, le chapitre sur les côtes, et, dans le *Traité de géologie* de HAUC, le chapitre XXVIII de la première partie ; ou encore SUESS, *La Face de la Terre*, t. II,

J'ajoute — et cela va de soi — que les faits expliqués par un déplacement du continent peuvent être également interprétés par un déplacement inverse du niveau marin, attribuable, soit à un phénomène de marée à grande envergure, soit à un changement bien hypothétique dans la vitesse de rotation terrestre. Cette dernière théorie, qui a rencontré quelques défenseurs, a été autrefois mise en avant par Swedenborg. Mais je crois beaucoup plus logique d'admettre une oscillation verticale des continents, rattachée à tout l'ensemble des phénomènes orogéniques. C'est la simple continuation actuelle de ce que nous constatons dans toute l'histoire géologique, aussi bien sur les aires de surélévation comme la Bretagne que sur les aires d'ennoyage comme le Bassin de Paris, où se sont produites tant d'alternances marines, lacustres et continentales.

II. TREMBLEMENTS DE TERRE ET VOLCANS

Dans la continuité de ces déplacements lents que nous constatons seulement après coup par des observations scientifiques, s'intercalent de temps en temps des accidents brusques, tremblements de terre ou éruptions volcaniques. Un tremblement de terre, ou « séisme », c'est un mouvement du sol, qui se déplace verticalement ou latéralement et qui se tord. Si le sol est sous-marin, il y a raz de marée. Une éruption volcanique, c'est un dégagement de vapeurs et de laves. L'installation, devenue générale, d'appareils enregistreurs où viennent s'inscrire toutes les vibrations du sol, montre la fréquence extrême des mouvements vibratoires, représentant les échos de tremblements de terre plus ou moins lointains, qui eux-mêmes sont très multipliés. On

perçoit, sur l'ensemble de la terre, plus de 30.000 secousses par an et 300 d'entre elles ont une importance assez grande pour qu'on puisse analyser leur mécanisme.

Ces appareils nous apportent en outre des renseignements précieux sur l'origine de chaque séisme et sur la constitution intérieure de la Terre qui le transmet. On observe, en effet, que le tremblement de terre provoque à distance une série de secousses obéissant à un rythme bien déterminé (cela pour une secousse initiale unique, la série des secousses qui peuvent se renouveler au lieu d'origine entraînant chaque fois une répétition semblable). D'abord, il arrive de petites vibrations dont la période varie d'un dixième de seconde à cinq secondes ; puis une seconde phase avec des vibrations d'amplitude plus grande et de période plus longue ; enfin une troisième phase retardataire avec de grandes ondes à périodes atteignant trente secondes. Ces trois phases sont trois échos d'un même choc répercuté jusqu'à nous par des voies différentes.

Quand on connaît, d'autre part, le lieu et l'instant initial, on peut calculer les trois vitesses de propagation. Dans les deux premières phases, où cette vitesse est la plus élevée, elle peut atteindre respectivement 9 km. 6 par seconde et 5 kilomètres par seconde. Plus la distance parcourue est grande, plus cette vitesse est forte. On se rend compte qu'il s'agit là d'une propagation dirigée suivant la ligne droite à travers le globe. Les deux phases correspondent aux deux ondes, l'une longitudinale, l'autre transversale, que fait prévoir la théorie de l'élasticité. La vitesse augmente avec la distance parce que la trajectoire pénètre plus profondément dans le globe et y rencontre une élasticité supérieure. Dans le sens du diamètre, pour parvenir aux antipodes, la traversée totale de la terre s'effectue en vingt-deux minutes : ce

qui laisse supposer un noyau terrestre deux fois plus rigide que l'acier. C'est par des calculs du même genre, mais en y introduisant d'autres données singulièrement discutables, que l'on a parfois évalué l'épaisseur de la croûte scoriacée à composition siliceuse, de la « lithosphère » qui enveloppe notre globe, à 1.400 kilomètres.

Quant à la troisième onde, sa vitesse est beaucoup plus faible : 3 à 3 km. 5 par seconde. Elle résulte d'une transmission opérée par la surface comme un frisson dans la peau. La composition de la surface étant en moyenne uniforme, on s'explique comment la vitesse de propagation apparaît ici constante, quelle que soit la distance parcourue. Cela ne doit pourtant s'entendre que pour des distances un peu fortes ; car, lorsqu'on mesure directement la vitesse de propagation dans des terrains divers, on constate que, dans les sables, elle peut descendre à 300 mètres par seconde, tandis qu'elle atteint 4 kilomètres dans les roches cristallines.

On conçoit, dès lors, comment, en tenant compte des temps écoulés entre ces trois phases dont on connaît la vitesse, on peut calculer à quelle distance s'est produit le séisme initial. On a, en outre, sa direction par les pendules horizontaux. Il est donc possible, avec une seule station sismographique, de dire en quel point de la terre, souvent à plusieurs milliers de kilomètres, et à quel instant s'est produit un cataclysme dont on n'a pourtant observé qu'une répercussion très faible. Mais c'est là une sorte de tour de force, et l'on obtient beaucoup plus simplement (quoique plus longuement) le même résultat avec plus d'exactitude en combinant les observations de nombreuses stations. On trace ainsi des courbes « isosismiques », analogues aux courbes d'égale pression barométrique que les journaux ont vulgarisées

pour la prévision du temps. Ces courbes relient tous les points où la vibration initiale est arrivée simultanément et qui sont donc à égale distance de l'origine. Le centre de ces cercles concentriques donne cette origine, ou du moins sa projection verticale sur la superficie terrestre, appelée son « épicentre ».

On peut ensuite aller plus loin et, par l'observation de ces mêmes cercles, reconnaître la distance verticale à laquelle le centre réel se trouve de son épicentre superficiel, la profondeur terrestre à laquelle s'est produit le mouvement. Il est, en effet, facile de constater que les ondes parcourues sur la surface (la troisième phase indiquée plus haut), tout en se propageant avec une vitesse constante, s'inscrivent à intervalles égaux sur des cercles de plus en plus rapprochés à mesure qu'elles s'éloignent. Cela tient précisément à ce que leur origine est profonde : en sorte que les ondes réellement décrites sont des sphères dont nous constatons simplement les intersections avec la surface. Or, sans faire beaucoup de géométrie, chacun comprend que, si le centre d'ébranlement coïncidait avec le centre terrestre, tous les points de la terre recevraient l'ébranlement en même temps. Si, au contraire, le centre était la superficie même, les cercles seraient rigoureusement équidistants. Dans les cas intermédiaires qui sont ceux de la réalité, un calcul simple permet, par l'écartement des cercles, de savoir la profondeur. On constate ainsi que les centres sismiques profonds, — ou plutôt les taches sismiques pouvant couvrir quelques kilomètres d'étendue, — sont rarement à plus de 30 kilomètres de la superficie et souvent seulement à 7 ou 8. Le séisme est, contrairement à la première apparence, un phénomène tout à fait superficiel (le mot superficiel étant entendu au sens géologique).

Nous arriverons tout à l'heure à une conclusion analogue pour le volcanisme et, plus généralement, quoique d'une façon dubitative, nous sommes tentés de l'étendre à tous les mouvements géologiques récents. Il ne semble pas qu'il y ait lieu de faire intervenir, dans tous ces phénomènes, les grandes profondeurs du globe, mais seulement une région de l'écorce à peu près assimilable à celle dans laquelle nous pénétrons d'une manière si insignifiante, sur un kilomètre ou deux, par nos travaux souterrains. Et c'est fort heureux pour notre science ; car cela nous permet de raisonner avec quelque vraisemblance sans appliquer nos lois physiques superficielles au noyau interne de la Terre, dont nous ne savons à peu près rien de sérieux, si ce n'est que les conditions doivent y être totalement différentes de ce que nous connaissons et, par conséquent, ces lois physiques inapplicables.

Ces points fondamentaux ayant été établis, la suite du problème sismique devient une étude géologique dont je n'ai plus à analyser les procédés et dont la conclusion principale, que je me borne à indiquer en ce moment, sera, nous le verrons, l'assimilation des régions sismiques à des zones « inachevées » du globe, à des zones sur lesquelles se continuent les phénomènes orogéniques, avec des affaissements profonds de terrains, pouvant se manifester à l'extérieur par des failles. Le tremblement de terre résulte d'un tassement, d'un glissement, d'un effondrement qui, pour une cause quelconque, se produit dans les terrains de l'écorce terrestre à quelques kilomètres de profondeur.

Quand il s'agit du volcanisme, on est beaucoup moins bien armé pour les études de précision. Nous ne possédons que des notions vagues et contestées sur la profondeur à

laquelle se forment les roches en fusion, et nous les voyons arriver à la surface, par intrusion, presque indépendamment des conditions géologiques locales. Ce n'est pas que l'étude du volcanisme n'ait été poursuivie avec infiniment de persévérance et de courage. Mais elle ne peut s'appliquer directement qu'au mécanisme et à la chimie des manifestations superficielles ; la profondeur lui échappe. Elle se borne à nous renseigner sur la position géographique des orifices volcaniques, sur les processus pétrographiques ou minéralogiques de l'opération, sur la température des roches ou des gaz, sur la composition des fumerolles gazeuses et des roches observées dans des phases ou à des profondeurs diverses. Tout cela est d'un intérêt puissant pour la géologie des roches ignées et des gîtes métallifères, mais nous instruit fort peu, ou seulement d'une manière hypothétique, sur l'origine du volcanisme, qui reste un champ ouvert aux disputes des hommes.

Nous avons cependant un moyen d'investigation indirect, dont on ne tient pas assez compte et que je voudrais signaler : c'est de comparer aux volcans actuels les volcans éteints et démantelés depuis de longues périodes géologiques, depuis des millions d'années sans doute. J'ai insisté à bien des reprises sur le rôle intense des érosions dans l'histoire de la terre, sur les coups de rabot successifs, au moyen desquels ces érosions réduisent progressivement d'anciennes cimes alpestres à des plateaux comme l'Ardenne ou la Bretagne. Plus une chaîne de montagnes est vieille, plus elle est usée et aplaniée. Or ce travail n'épargne naturellement pas les volcans d'âge primaire, secondaire ou tertiaire qui peuvent se trouver le long de la chaîne plissée. Les volcans de ces différents âges ayant dû être en moyenne assez analogues entre eux, on peut admettre que, plus un volcan est vieux,

plus nous pénétrons dans sa profondeur. Les coupes superposées d'un volcan primaire, d'un volcan secondaire, d'un volcan tertiaire et d'un volcan actuel deviennent alors assimilables à des coupes superposées d'un même volcan en activité. Quand nous remontons le cours des âges en étudiant successivement des zones géologiques de plus en plus anciennes, nous accomplissons par la pensée, vers le centre de la terre, un voyage plus instructif que celui de Jules Verne.

La première conséquence qui me paraît en découler est que le rayon d'action de ces manifestations volcaniques doit être, comme ordre de grandeur, peu supérieur à celui des séismes : au plus une ou deux centaines de kilomètres. Je faisais tout à l'heure allusion à des calculs qui donnent, pour l'écorce pierreuse du globe, une épaisseur de 1.400 kilomètres. A mon avis, il faut beaucoup se défier des mathématiques appliquées aux phénomènes naturels, surtout quand les données sur lesquelles reposent des équations d'apparence rigoureuse sont, en trop grande partie, arbitraires. J'ajouterai même que, pour des questions géologiques comme celles-ci, l'analyse chimique ne me paraît pas non plus pouvoir être invoquée aveuglément : non pas parce qu'elle n'est pas exacte, mais parce qu'on risque trop de l'interpréter abusivement en renversant par exemple l'ordre de cause à effet entre les phénomènes. Rien ne vaut les observations directes sur le terrain et leur coordination raisonnée. Or, d'après ces observations, si l'écorce pierreuse avait réellement une telle épaisseur, elle aurait en tout cas les plus grandes chances d'être à l'état liquide au moins à partir de 100 ou 200 kilomètres, et tout le reste doit être sans influence sur ce que nous constatons à la superficie.

Dans toutes les régions ignées anciennes, nous voyons,

en effet, comme on l'a vu plus haut, à la base des épanchements et des filons, un magma granitique. Au-dessus de ces granites, on observe ensuite que les parties les plus liquides des mêmes magmas fondus, accompagnées de matières volatiles et de vapeur d'eau, se sont élevées dans des crevasses de l'écorce, dans des filons dont la hauteur verticale semble également limitée à un petit nombre de kilomètres. Enfin, quelques-unes de ces masses ont réussi à percer la superficie et à y déverser des roches de toute nature qu'une certaine analogie d'aspect fait confondre ordinairement sous le nom de laves, en même temps que s'épanchaient violemment les gaz englobés.

Si l'on envisage les accidents terrestres d'un œil placide, comme pourrait le faire un habitant de la lune ou un géant, tout le volcanisme se résume en ce simple exposé. C'est, à l'échelle de la terre, bien peu de chose que l'ouverture de ces quelques pustules, par lesquelles sortent, avec du bruit et de la fumée, quelques kilomètres cubes de laves. Là est cependant, dans ces pustules, la partie du volcanisme pratiquement intéressante pour l'homme, à laquelle nous arrivons.

Sur un volcan en activité, ce qui frappe d'abord, c'est le cône, c'est le cratère, c'est la protubérance d'où jaillissent les vapeurs et d'où s'écoulent latéralement les laves. L'idée que ce cône s'est produit par une intumescence du sol vient tout naturellement à l'esprit et s'est condensée dans la vieille théorie démodée des « cratères de soulèvement ». Disons donc aussitôt que, malgré les formidables pressions en jeu, malgré la montée évidente des laves jusqu'à 6.000 mètres d'altitude, malgré les projections de cendres et de lapilli, malgré les ascensions locales d'aiguilles rocheuses, le volca-

nisme ne comporte aucun *soulèvement* notable du sol. A cet égard, toutes les observations sont concluantes.

Nous devons simplement nous représenter un orifice circulaire ouvert par une explosion interne sur une ligne de fracture, souvent à peine marquée à la superficie. Bientôt les roches pulvérisées en cendres, qui, dans cette sorte de cheminée, sont projetées et lancées par la vapeur d'eau, retombent tout autour en prenant vers l'extérieur la pente ordinaire des talus d'éboulement. Avec elles, les débris de roches, les bombes lancées parfois jusqu'à 2 à 3 kilomètres de haut. Puis les laves continuent à monter dans la cheminée, qui elle-même tend souvent à grandir. Bien rarement, ces laves atteignent le cratère supérieur. Généralement, elles crèvent les cendres sur les parois latérales du cône, forment de petits cratères adventifs et coulent à la superficie. Ainsi l'appareil, d'abord meuble, se consolide et peut prendre l'ampleur si caractéristique de l'Etna, ou les dimensions plus restreintes du Vésuve. Le cratère est construit. Pendant des siècles ou des millénaires, il donne alors lieu à des éruptions plus ou moins espacées, jusqu'au jour où il sera définitivement éteint et où, comme nous l'avons vu, l'érosion commencera à le démolir.

Qu'est-ce qu'une éruption ? La manifestation momentanée à la surface d'une activité interne permanente, à laquelle la cheminée volcanique offre de temps en temps une issue. Mais d'où vient cette poussée profonde, pourquoi s'arrête-t-elle et pourquoi recommence-t-elle ?

Dans la violence de l'éruption, la vapeur d'eau joue un rôle incontestable. De là à supposer que l'éruption est provoquée par une introduction d'eau superficielle dans des crevasses, il n'y a qu'un pas. Cette eau, agissant à de hautes températures comme un acide puissant, peut déplacer l'acide

silicique antérieurement combiné aux bases et déterminer un gonflement. L'action de l'eau vaporisée peut également se borner à être mécanique. Puis, en approchant du jour, cette eau, chimiquement ou mécaniquement incluse dans les roches, doit se dégager avec des explosions, d'où résultent de nouvelles fissures et de nouvelles infiltrations aqueuses. A l'appui de cette idée, on a fait remarquer la très fréquente localisation des volcans le long de la mer : localisation qui tient, je vais le dire, à d'autres causes et qui n'est d'ailleurs nullement constante, mais qui peut avoir pour effet d'entretenir et d'exacerber le volcanisme. On a également observé certaines influences saisonnières sur l'activité volcanique. Toutes les dernières grandes éruptions de l'Etna, en 1879, 1886, 1892, 1911, 1921, se sont produites à la même époque, entre mai et juillet. Enfin, les craquements et les grondements qui précèdent une éruption sont fréquemment accompagnés par la fonte des neiges et la disparition des sources. Ces neiges fondues et ces sources englouties ne sont pas la cause de l'éruption, mais elles contribuent à lui fournir de la vapeur d'eau.

Il y a cependant une autre théorie, à laquelle j'ai déjà fait allusion, d'après laquelle l'eau des volcans serait de l'eau « juvénile » arrivée pour la première fois au jour ; cette eau nous représenterait même la source interne d'où proviendraient les mers, et l'analogie de composition chimique entre les mers et les fumerolles gazeuses en résulterait.

Maintenant, si l'éruption, une fois commencée, s'arrête, c'est évidemment que la réserve de roches ignées, avec la pression des gaz qui les met en branle, tend à s'épuiser. Dans un volcan déterminé, la durée des éruptions successives est souvent très analogue (une quinzaine de jours à l'Etna), comme si une poche interne mettait ce temps à se

vider. En outre, la lave qui monte au jour tend à s'y refroidir et à obstruer sa cheminée d'ascension, comme cela se produit par incrustation dans les cheminées ascensionnelles des sources thermales riches en acide carbonique, genre Carlsbad ou Vichy. Il se produit donc finalement, au haut de cette cheminée, un bouchon de roche, au-dessous duquel les matières en fusion subsistent. Quelquefois même l'obstruction n'est pas complète, mais la lave fondue reste calme.

L'éruption se produit le jour où la pression augmente et fait sauter ce bouchon de roche, ou détermine sa fusion par la base. Elle sera d'autant plus violente qu'elle aura eu plus de mal à atteindre la superficie. On distingue ainsi deux grands types de volcanisme : le premier à cataclysmes foudroyants comme l'effondrement du Krakatoa ou l'explosion de la montagne Pelée ; le second à manifestations plus fréquentes, mais moins graves, comme l'Etna, le Vésuve, etc. Dans un cas, l'abcès crève ; dans l'autre, il s'écoule par un drain. La différence tient d'abord à la fusibilité plus ou moins grande des roches. Les laves très peu fusibles, très siliceuses, sont sujettes à se rompre brusquement. On voit l'aiguille rocheuse se soulever, puis éclater. Avec les laves plus fusibles, le désastre est plus fréquent mais moins intense. C'est le second type que nous avons l'occasion d'observer dans la Méditerranée. Par parenthèse, le fait que, dans une série d'éruptions successives pouvant englober plusieurs époques géologiques, les laves d'un même volcan gardent à peu près la même composition, prouve qu'elles sont puisées dans une zone restreinte et constante, non dans une grande réserve générale. Très probablement, dans ces zones éruptives où les matières fondues s'approchent du jour, elles s'incorporent les terrains préexistants de la région, et leur composition spéciale en résulte.

Le long de telles zones à pénétrations ignées, rendues par là plus fragiles, les volcans doivent se produire sur des cassures longitudinales, d'où résultent leurs alignements bien connus, peut-être à la rencontre de fractures transversales. Les dislocations de l'écorce contribuent certainement à leur présence. Comme les tremblements de terre, les volcans se trouvent dans des parties « inachevées » de notre globe ; mais ils y sont beaucoup plus localisés. L'effondrement d'une maison produit toujours une secousse ; mais il ne détermine pas nécessairement une explosion de gaz et un incendie.

Voici maintenant comment un tremblement de terre peut être assimilé à un simple épisode orogénique. J'ai expliqué précédemment que, d'après l'examen du degré géothermique, l'écorce solide de la Terre devait avoir, suivant les régions, des épaisseurs très inégales. Les zones où elle est peu épaisse et, par conséquent, fragile, sont les zones sismiques. Qu'il s'y produise, en profondeur, un affaissement, un glissement, une solidification amenant une contraction et, par suite, une tendance au vide ; que, plus en grand, si on le veut, un compartiment terrestre se déplace en flottant sur la mer interne comme les glaçons d'une banquise, la superficie en subit le contre-coup, et les êtres humains sont si petits qu'un déplacement vertical de 1 ou 2 mètres sur un rayon terrestre de 6.400 kilomètres suffit à renverser leurs édifices les mieux construits.

Nous assistons ainsi, sans en avoir nettement conscience, à la continuation très restreinte et très localisée d'un mouvement analogue à ceux qui se sont reproduits si souvent jadis. La « tectonique », ou architecture du globe, n'est pas finie. La dernière Alpe n'est peut-être pas encore surgie ni la dernière Atlantide engloutie.

Dans l'exposé précédent, j'ai parlé à la fois et sans distinction des tremblements de terre et des volcans. C'est relier les deux groupes de phénomènes par un lien que l'on a été très anciennement conduit à admettre, que l'on a beaucoup discuté dans ces derniers temps, mais qui continue à paraître réel si l'on envisage les causes profondes, à la condition de l'interpréter rationnellement, comme je me suis déjà trouvé l'indiquer en passant, et de le préciser.

On ne saurait nier que les régions du globe troublées par les éruptions volcaniques soient, en même temps, agitées par les mouvements sismiques, la réciproque n'étant pas toujours vraie et la coïncidence restant approximative. Les éruptions sont également, quoi qu'on en ait dit, fréquemment accompagnées, précédées et suivies de séismes. L'imagination populaire ne se trompe donc pas en assimilant quelque peu ces deux genres de désastres, qui ont tous les deux leur origine manifeste dans les profondeurs de la terre. L'erreur commence (ou du moins nous paraît commencer suivant nos théories actuelles) quand on s'imagine que les tremblements de terre sont provoqués par des explosions volcaniques, ou, plus généralement, par le volcanisme. Nous admettons aujourd'hui que les deux groupes de phénomènes ne sont pas la cause l'un de l'autre, mais ont tous les deux habituellement une même cause. Leur lien de parenté n'est pas une paternité mais une fraternité. Les tremblements de terre sont beaucoup plus fréquents que les éruptions, tout au moins dans leurs effets, qui se propagent au loin, et il peut exister des centres d'ébranlement sismique ne présentant aucun rapprochement avec les volcans.

Le déplacement interne, qui constitue le tremblement de terre et qui peut, par contre-coup, mettre en action le vol-

canisme, se produit, je l'ai expliqué, à quelques kilomètres de profondeur, dans cette croûte de roches scoriacées, souvent recouverte par un manteau de sédiments, qui porte nos champs, nos villes et nos mers. Rappelons-nous nos conclusions précédentes. A 50 ou 100 kilomètres de la surface, cette scorie devient localement liquide, et la « lithosphère » passe à la « pyrosphère ». C'est dans le contact entre la partie solide et la partie liquide que paraît se trouver l'origine des principaux déplacements constatés plus près de la superficie et jusque sur celle-ci. La compression latérale des parois solides (« avant-pays » et « arrière-pays ») sur ces fuseaux liquides imprime un mouvement tangentiel. Mais le sens du déplacement commence, en principe, par être vertical et de haut en bas. Ce qui n'empêche pas des surrections résultant d'un morcelllement en forme de coin : un coin que l'on comprime à la base tend à s'échapper en l'air.

Le moment est venu maintenant de distinguer entre la cause profonde que nous nous bornons à supposer ainsi logiquement et les effets plus ou moins directs que nous observons.

Prenons d'abord le tremblement de terre. A intervalles irréguliers, il doit se produire en profondeur des chutes brusques, comparables, soit à la rupture d'un voussoir ou d'une solive, soit à la bascule d'un iceberg quand la fusion de sa base a déplacé son centre de gravité. C'est la secousse initiale du centre sismique. Elle a lieu de préférence et avec une intensité spéciale sur ces zones fragiles de l'écorce, ces zones inachevées, dont la Méditerranée ou les deux côtes du Pacifique sont les exemples les plus caractéristiques. Mais on comprend aisément que, dans une telle zone même, le mouvement puisse n'atteindre la surface que par ricochets successifs et, par conséquent, n'y être nullement contempo-

rain du déplacement le plus profond qui l'a déterminé. Tout déplacement quelconque des terrains profonds ayant une autre cause, comme un simple éboulement provoqué par les pluies, produira le même effet ; et c'est pourquoi la zone d'extension des séismes est très large et peut même, par rapport à la théorie précédente, offrir des anomalies. Le déplacement profond est prouvé par les dénivellations fréquentes de la superficie, par les « failles », qui, au Japon, ont été observées sur 100 et 200 kilomètres de long.

Un tel déplacement interne peut fort bien n'avoir aucun contre-coup sur les parties ignées ; le volcanisme n'est donc nullement un effet nécessaire et un compagnon forcé du tremblement de terre. Mais, inversement, un jaillissement important de laves vers la superficie entraîne des vides profonds, qui doivent plus ou moins vite amener des tassements et des séismes. C'est pourquoi il existe une certaine coïncidence approximative entre les zones sismiques et les zones volcaniques.

En général, le mouvement sismique paraît correspondre à une action tangentielle, à une forme de plissement. Le volcanisme est une conséquence directe des mouvements verticaux qui sont plus localisés dans l'écorce. Tous deux représentent, sous nos yeux, les dernières manifestations actives des forces internes qui, luttant avec les ruissellements aqueux de la surface, tantôt victorieuses, tantôt vaincues, ont produit nos roches ignées et nos sédiments, nos montagnes et nos océans : ces témoins subsistants, grâce auxquels nous reconstituons l'Histoire de la Terre.

BIBLIOGRAPHIE

1862. R. MALLET. *The great neapolitan Earthquake*
1879. FOUQUÉ. *Santorin et ses éruptions.*
1906-1907. DE MONTESSUS DE BALLORE. *Les tremblements de terre.*
La science séismologique. (Armand Colin).
1898. MICHEL LEVY. *Sur la coordination et la répartition des fractures et des effondrements de l'écorce terrestre en relation avec les épanchements volcaniques.* (*Bul. Soc. Géol.*, t. XXVI).



ABBEVILLE. — IMPRIMERIE F. PAILLART.

Nos 3-4

RENÉ CANAT

Docteur ès-lettres

Professeur de rhétorique supérieure au Lycée Louis-le-Grand

La Littérature Française AU XIX^e SIÈCLE

Présenter sous un format pratique et commode une histoire littéraire du XIX^e siècle qui, vivement écrite et de lecture agréable, restât complète sous des apparences de résumé, tel est semble-t-il, le but que M. CANAT s'est efforcé d'atteindre, et son petit livre sera bien accueilli non seulement des étudiants mais de tous les amateurs de littérature enchantés de cheminer derrière un critique sûr et par des voies déblayées dans la complexité des Ecoles littéraires contemporaines.

(*L'Education.*)

N^o 13

ÉMILE BRÉHIER

Maitre de Conférences à la Sorbonne

Histoire de la Philosophie ALLEMANDE

M. Emile BRÉHIER étudie avec une parfaite sérénité l'« HISTOIRE DE LA PHILOSOPHIE ALLEMANDE », et il reconnaît la place particulière que cette philosophie occupe dans la civilisation intellectuelle de l'Europe, entre l'empirisme anglais et le rationalisme français.

(*L'Action Nationale.*)

N° 8.

HENRI CORDIER

Membre de l'Institut

LA CHINE

Cet ouvrage, divisé en deux parties, donne d'abord la description du pays, traitant en particulier de l'ethnographie, de la géographie, de la population, des religions, de l'administration, de l'armée, de la marine, des douanes et du commerce, des ports ouverts au commerce étranger, etc.; puis il présente l'histoire de la Chine depuis les époques les plus anciennes jusqu'à nos jours.

N° 18.

D^r G. CONTENAU

Chargé de Missions archéologiques en Syrie

LA CIVILISATION ASSYRO-BABYLONIENNE

Jusqu'au milieu du siècle dernier, la civilisation assyro-babylonienne ne nous était connue que par la Bible et les témoignages des auteurs anciens. Depuis, les fouilles archéologiques se sont multipliées en Mésopotamie. Grâce aux nombreux monuments et aux milliers de tablettes d'argile écrites en caractères cunéiformes qui en proviennent, il est possible aujourd'hui d'avoir une connaissance exacte de ce peuple dont la puissance a été aussi formidable que celle de l'Égypte dans le monde ancien. Tel est l'intérêt de cet ouvrage, écrit par un assyriologue éminent qui donne les résultats des fouilles les plus récentes et des dernières découvertes touchant ce passé qui remonte à plus de 3.000 ans avant notre ère.

Nos 25-26

ETIENNE GILSON

Chargé de cours à la Sorbonne

La Philosophie au Moyen-Age

Ces deux volumes forment un ouvrage de toute première valeur ; c'est non seulement l'histoire de la pensée philosophique au moyen-âge, mais la signification de cette pensée, sa fécondité incomparable, insoupçonnée, qui sont étudiées en des pages pleines et denses qui raviront les lecteurs ordinaires et les spécialistes. *(Revue des Lectures.)*

Nos 23-24

MAURICE CROISSET

Membre de l'Institut — Administrateur du Collège de France

La Civilisation hellénique

Un livre qu'on pourrait se dispenser de louer car son auteur est connu pour être le plus savant helléniste de France.
GUY LAVAUD.

Ayant passé sa vie entière dans le commerce intime et familial des grandes âmes de l'Hellade, M. Maurice CROISSET était à même, mieux que tout autre, de nous tracer en deux petits volumes, avec le résumé succinct mais essentiel de ses longues recherches et de ses méditations, l'exposé le plus clair, le plus solide et le plus nourri que nous ayons jusqu'ici des lignes directrices selon lesquelles se forma, se développa et se diffusa jusqu'à nous tout ce que le génie grec versa d'idées, de suggestion, de sentiments et de beautés dans le vaste courant de la pensée humaine.

MARIO MEUNIER.

N° 5.

LOUIS LÉGER

Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France

Les anciennes civilisations slaves

Résumé clair et bien fait des connaissances actuelles sur les divers peuples slaves anciens.

A. VAN GENNEP. (*Le Mercure de France.*)

Il faut un profond savoir pour dire beaucoup de choses en peu de mots. M. Léger a su condenser en quelques pages tout ce que sa vaste érudition a recueilli sur le problème des origines des peuples slaves, le berceau de leur race, leurs migrations, leurs antiques institutions politiques, sociales et économiques, leurs traditions religieuses.

(*Le Polybiblion.*)

N° 14.

E. ARIÈS

Correspondant de l'Institut

L'œuvre scientifique de Sadi Carnot

INTRODUCTION A L'ÉTUDE DE LA THERMODYNAMIQUE

Ce livre n'est pas un simple historique : pour faire saisir quelle répercussion ont eue les idées de Carnot sur la science de nos jours, l'auteur établit un magistral résumé de l'état actuel de la thermodynamique.

(*La Nature.*)

N° 15.

MAURICE DELAFOSSE

Ancien Gouverneur des Colonies, Professeur à l'École Coloniale
et à l'École des Langues orientales

Les Noirs de l'Afrique

Avec 4 cartes

Comment se sont constituées les premières sociétés noires et quelles influences extérieures ont agi sur leur évolution, comment se sont formés et développés les grands États soudanais aujourd'hui disparus, quelle a été l'histoire des principales populations nègres depuis l'origine jusqu'à nos jours, quelles sont aujourd'hui leurs civilisations : telles sont les questions auxquelles répond ce livre très nouveau écrit par un savant éminent.

N° 9

ERNEST BABELON

Membre de l'Institut

Conservateur du Cabinet des Médailles, Professeur au Collège de France

Les Monnaies grecques

APERÇU HISTORIQUE

Avec 21 illustrations dans le texte

M. Ernest Babelon vient de publier dans la **Collection Payot** un volume, "**Les Monnaies grecques**", qui peut être une excellente initiation. Lisez les pages pleines de science et de goût qu'il nous a données; vous y suivrez l'histoire de la monnaie antique. *(L'Action Française.)*

C'est un immense domaine qui est exploré ici : environ 1.400 villes et 500 rois ou chefs d'Etats du monde hellénique ont battu monnaie à leurs noms, entre le VII^e siècle av. J.-C. (époque où la monnaie grecque fut inventée) et le milieu du III^e siècle ap. J.-C., époque où elle acheva de disparaître, absorbée ou remplacée par la monnaie romaine. C'est l'évolution historique de ces vastes séries monétaires que M. Babelon nous présente en un récit synthétique où tous les mots portent. *(L'Ami du Clergé.)*

N° 10

GEORGES MATISSE

Docteur ès-sciences

Le mouvement scientifique contemporain en France

I. LES SCIENCES NATURELLES

Avec 25 figures dans le texte

L'auteur a choisi parmi les savants les plus éminents dans chaque branche quelques-uns de ceux qui ont véritablement créé ou fait avancer la science. Il a analysé leurs œuvres de façon approfondie, cherchant toujours à mettre en lumière les principes et les idées générales ayant une valeur scientifique et une portée philosophique. *(La Croix.)*

Ce premier volume d'un ouvrage destiné à faire connaître au grand public le mouvement scientifique contemporain en France expose d'admirables découvertes françaises récentes en botanique, zoologie et biologie générale. *(La Nature.)*

No 20.

H. ANDOYER

Membre de l'Académie des Sciences et du Bureau des Longitudes
Professeur à la Sorbonne

L'œuvre scientifique de Laplace

Au moment où des théories nouvelles tentent de battre en brèche l'édifice de la mécanique newtonienne, il est utile qu'un savant éminent présente, telle qu'elle ressort de l'œuvre scientifique immense de Laplace, la conception du système du monde fondée sur la théorie de la gravitation universelle.

No 21.

JEAN BECQUEREL

Professeur au Muséum d'Histoire naturelle

Exposé élémentaire de la Théorie d'Einstein et de sa généralisation

Suivi d'un appendice à l'usage des mathématiciens

Avec 17 figures

Les théories d'Einstein jouent et joueront un tel rôle dans les sciences et la philosophie des sciences de demain que la **Collection Payot** avait le devoir de donner en un volume un résumé de ces théories avec le moins de mathématiques possible. Elle s'est adressée pour cela à un des meilleurs physiciens français.

No 22.

A. BERTHOUD

Professeur de Chimie-Physique à l'Université de Neuchâtel

La constitution des atomes

Avec 18 figures

Le but de cet ouvrage est de donner un exposé concis et élémentaire, mais aussi précis et aussi complet que possible, des connaissances actuelles sur la structure des atomes et la constitution de la matière.