

to press,

BAEIOI

NONI
ATCY

QE26
L3
1892
c. 1

WAL

20-6



1080078562



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#86#191

55



ABRÉGÉ
DE GÉOLOGIE

U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



DU MÊME AUTEUR

TRAITÉ DE GÉOLOGIE

Deuxième édition, revue et très augmentée. 1 vol. gr. in-8 de xvi-1504 pages avec 666 fig. dans le texte. 24 fr.

COURS DE MINÉRALOGIE

Deuxième édition, revue et augmentée. 1 vol. grand in-8° de xvi-648 pages avec 598 gravures dans le texte et une planche chromolithographiée 45 fr.

PRÉCIS DE MINÉRALOGIE

Un volume in-18 de xii-384 pages avec 335 gravures dans le texte et une planche chromolithographiée 5 fr.

FOSSILES CARACTÉRISTIQUES
DES TERRAINS SÉDIMENTAIRES

Dessinés d'après la collection de l'Institut catholique de Paris, par Paul Fritel.

Fossiles Primaires — Secondaires — Tertiaires.

3 vol. gr. in-4° avec 42 planches représentant 1185 fossiles. 21 fr.

Séparément : Fossiles Tertiaires, grand in-4° avec 12 planches. 6 fr.

LA GÉOLOGIE EN CHEMIN DE FER

Description géologique du Bassin parisien et des régions adjacentes (Bretagne aux Vosges. — Belgique à Auvergne). 1 vol. in-18, cartonné en toile anglaise, non rogné, de 600 pages avec 2 cartes chromolithographiques et 1 carte de coupes. 10 fr.

LE SIÈCLE DU FER

Un volume in-18 de 360 pages. 3 fr. 50

Chap. I. Les débuts de l'emploi du fer dans les constructions. — Chap. II. Les premiers ponts en tôle. — Chap. III. Le fer dans les édifices. — Chap. IV. Viaducs métalliques. — Chap. V. Les débuts de l'industrie des chemins de fer. — Chap. VI. La voie ferrée. — Chap. VII. Les voitures de voyageurs. — Chap. VIII. La locomotive. — Chap. IX. Les signaux et les freins. — Chap. X. Les chemins de fer économiques.

LA QUESTION DU CHARBON DE TERRE

Un volume in-18 de 122 pages. 1 fr. 50

Coulommiers. — Imp. Paul BRODARD.

ABRÉGÉ

DE

GÉOLOGIE

PAR

A. DE LAPPARENT

DEUXIÈME ÉDITION

ENTIÈREMENT REFOUDUE

AVEC 134 GRAVURES DANS LE TEXTE

ET UNE CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE, CHROMOLITHOGRAPHIÉE

503.

PARIS

LIBRAIRIE F. SAVY

77, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 77

1892

14412

Q226

L3

1892



PRÉFACE

Ce livre est destiné à la fois aux personnes désireuses d'acquérir une connaissance générale des données de la Géologie et aux élèves des établissements d'instruction secondaire, où l'enseignement de cette science intervient à deux reprises durant le cours des études classiques. Laissant de côté les détails, traités dans un autre ouvrage¹ avec tous les développements voulus, on s'est proposé surtout de faire ressortir la magnifique harmonie des phénomènes géologiques et de mettre en pleine lumière les grandes idées d'ordre et de *finalité*, dont l'histoire du globe est comme imprégnée.

L'*Abrégé de Géologie* est un exposé très succinct, qu'on a cherché à rendre aussi substantiel que pos-

1. Voir de Lapparent, *Traité de Géologie*, 1 vol. gr. in-8° de xvi-1504 pages; 2^e édition. Paris, Savy, 1885.

sible, et dont chaque alinéa résume un chapitre de la science. Mais en même temps l'auteur a mis tous ses soins à éviter, dans la forme, l'aridité qui pouvait résulter d'une telle condensation. Il espère que cet effort sera apprécié, non seulement par la jeunesse studieuse, mais par les géologues de profession, à qui l'enchaînement des faits et des doctrines pourra sembler d'autant plus frappant, que l'impression générale sera moins affaiblie par le luxe des détails.

Ce livre aurait atteint son but si, tout en satisfaisant la légitime curiosité de ceux qui bornent leur ambition à la connaissance des grandes lignes de l'histoire terrestre, il parvenait à éveiller, chez beaucoup de jeunes gens, le goût de la culture de la Géologie. On peut dire de cette science que l'objet en est aussi attachant que la pratique en est saine. Comprendre la structure du sol qu'on foule aux pieds; démêler la raison de ses formes si diverses, de ses productions si variées; faire revivre les époques disparues, non par les rêves de l'imagination, mais par une série d'inductions appuyées sur l'expérience, quelle perspective séduisante pour un esprit cultivé! Quel surcroît d'intérêt dans les voyages, surtout quand vient s'y joindre l'attrait de la recherche des minéraux ou de la récolte des fossiles! En même temps, pourrait-on désirer un meilleur emploi de ses loisirs que ces courses au grand air, qui entretien-

nent l'activité du corps, tout en obligeant l'esprit à une constante et intelligente contemplation des beautés de la Création?

Si, pendant longtemps, ces satisfactions ont dû rester le privilège de quelques initiés, il est temps qu'elles se répandent et que le grand nombre soit appelé à en jouir. La Géologie est assez avancée aujourd'hui, elle est en possession de résultats suffisamment précis, pour que la réalisation d'un tel vœu ne soit pas une espérance chimérique. Il est du moins permis d'y travailler, et c'est à quoi prétend ce petit livre, dont l'auteur n'ambitionne pas de meilleure récompense que le succès de ses efforts en faveur de la diffusion d'études dont il lui a été donné d'apprécier le mérite.

A. DE LAPPARENT.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

SISTEMA GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ABRÉGÉ

DE

GÉOLOGIE

INTRODUCTION

La Géologie est la science qui a pour objet la structure de l'écorce terrestre. Par ce mot d'*écorce* nous entendons, sans rien préjuger relativement à la constitution intérieure de notre planète, la partie du globe accessible à nos investigations. En effet, la plus grande profondeur qu'un outil de sondage ait encore atteinte au-dessous de la surface de la terre ferme n'est guère que de 4700 mètres, quantité tout à fait insignifiante à côté des 6000 et quelques kilomètres que compte le rayon du globe. Aussi la portion de la terre que nous pouvons directement observer ne forme-t-elle qu'une mince pellicule relativement à l'ensemble.

L'étude de cette écorce n'est pas, pour l'homme, un simple objet de curiosité. Elle lui est imposée par la nécessité où il est d'aller chercher, dans le sein de la terre, les substances nécessaires au développement de la civilisation matérielle. En effet, c'est là que sont renfermés, avec les matériaux de construction,

les minerais d'où l'on extrait les métaux, les matières premières des produits chimiques, les amendements indispensables à l'agriculture, enfin et surtout les combustibles minéraux, sans le secours desquels l'industrie moderne serait condamnée à périr.

Or la recherche de ces substances utiles demande à être guidée par des règles précises, qui dispensent le mineur des longs et coûteux tâtonnements où l'entraîneraient des travaux poussés à l'aventure. Ignorées au début, ces règles sont nées, les unes après les autres, de l'expérience des générations successives, et peu à peu une observation patiente et réfléchie a permis de définir les conditions de gisement des minéraux. Longtemps cette définition ne s'est traduite que par des formules empiriques, suffisantes pour servir de base à l'art des mines. Mais à mesure que ces formules devenaient plus précises, elles prenaient aux yeux des esprits généralisateurs une signification nouvelle, et il suffisait bientôt de les rapprocher intelligemment les unes des autres pour en tirer la connaissance des grandes lignes architecturales de l'édifice terrestre. Ainsi s'est constituée sinon la géologie proprement dite, du moins la partie descriptive de cette science ou la *géognosie*.

D'autre part, notre planète n'est pas le produit d'un acte créateur instantané. De même qu'un édifice se compose d'assises superposées, dont les plus anciennes occupent la base et que souvent, si la construction a embrassé une longue durée, on en peut démêler les diverses phases d'après le style des parties successives; de même l'écorce du globe est constituée par des matériaux d'origines et de dates diverses. De cette façon, il est impossible d'étudier l'architecture de la terre sans toucher du même coup à son histoire. Ainsi, après s'être d'abord simplement proposé la découverte de règles pratiques pour guider les mineurs, on arrive, par la force des choses, en face du plus intéressant des problèmes, celui qui consiste à déchiffrer l'histoire de la planète terrestre. Et comme, lorsqu'il s'agit de la nature, toute histoire se résume dans la grande idée d'ordre, les efforts du géologue doivent tendre à mettre en évidence cette notion fondamentale, en nous apprenant à reconnaître l'ordre suivant lequel les matériaux du globe ont été disposés dans le temps et dans l'espace.

C'est cette mission historique qui fait, à vrai dire, le principal intérêt de la Géologie. Cet intérêt est d'autant plus grand qu'au lieu d'une succession monotone de phénomènes identiques, se reproduisant périodiquement à divers intervalles, l'histoire de la terre nous fait assister à une suite merveilleusement ordonnée de transformations, et met sous nos yeux, à mesure que nous remontons le cours des âges, des tableaux de plus en plus différents de ceux qu'il nous est donné de contempler aujourd'hui.

Mais de là résultent aussi des difficultés d'un ordre tout particulier. Quand l'historien cherche à faire revivre, à l'aide des monuments, des inscriptions ou des sépultures, ces peuples primitifs à l'égard desquels la tradition est restée muette, il est puissamment aidé dans sa tâche par la connaissance des nécessités de la nature humaine. Un secours analogue fait souvent défaut au géologue, et parmi les matériaux dont le globe se compose, matériaux qui tous sont des monuments du passé, beaucoup s'écartent à un tel degré des objets habituels de nos expériences, qu'on peut à peine soupçonner les conditions sous l'empire desquelles ils ont dû se constituer.

Heureusement cette variété ne porte que sur les associations et les combinaisons des substances. Ces dernières n'ont jamais changé, non plus que l'essence des forces auxquelles elles ont toujours été soumises. L'observation directe, et, à son défaut, l'expérimentation, doivent pouvoir rendre compte des combinaisons constatées, et ainsi l'étude du présent s'impose comme seule apte à nous fournir la clef du passé. Voilà pourquoi il est utile et même indispensable de donner pour préface, à l'histoire ancienne de notre globe, un examen des grands traits de la géographie actuelle, ainsi que des principales transformations qui s'accomplissent aujourd'hui sous nos yeux.

LIVRE PREMIER
PHÉNOMÈNES ACTUELS

CHAPITRE PREMIER

FORMES ACTUELLES DU GLOBE TERRESTRE

§ 1

DONNÉES ASTRONOMIQUES

Révolution et rotation de la terre. — La terre est un globe presque exactement sphérique, de 40 000 kilomètres de circonférence, décrivant en une année une courbe plane elliptique autour du soleil, dont son centre est éloigné d'environ 150 millions de kilomètres. A cette distance, malgré les grandes dimensions de l'astre central comparées à celles de la terre, les rayons lumineux envoyés à notre planète sont parallèles entre eux, comme s'ils venaient de l'infini. Leur faisceau cylindrique touche donc la terre suivant un *grand cercle d'illumination*, qui la partage à tout instant en deux moitiés égales, l'hémisphère éclairé et l'hémisphère obscur.

D'ailleurs, en même temps qu'elle accomplit sa révolution annuelle, la terre tourne sur elle-même en vingt-quatre heures, autour d'une ligne de direction fixe, qu'on appelle l'*axe des pôles*.

Saisons. — Si l'axe des pôles était à angle droit sur le plan de l'orbite terrestre ou écliptique, chaque point de notre globe,

pendant le mouvement de rotation diurne, passerait douze heures dans l'hémisphère éclairé et autant dans l'autre. Le jour serait donc partout égal à la nuit.

Mais l'axe terrestre est incliné d'une quantité notable (fig. 1) et, par suite, le grand

cercle d'illumination ne coïncide pas avec un méridien. Aussi, à l'exception de deux moments de l'année, appelés *équinoxes*, partout, sauf à l'équateur, les durées relatives du jour et de la nuit sont-elles inégales. D'ailleurs, pendant la révolution annuelle, cette différence

varie d'une manière continue, changeant de sens tous les six mois. De là résulte le jeu des *saisons*, par suite duquel chaque hémisphère est tour à tour favorisé sous le rapport de la lumière et de la chaleur. Peu sensible entre l'équateur et les tropiques, l'influence des saisons devient de plus en plus marquée à mesure qu'on s'élève vers les pôles. Par elle, l'année se trouve partagée dans les hautes latitudes en deux phases, dont l'une est caractérisée par l'activité des phénomènes physiques de tout ordre, tandis qu'à l'autre correspond un repos presque complet de la nature.

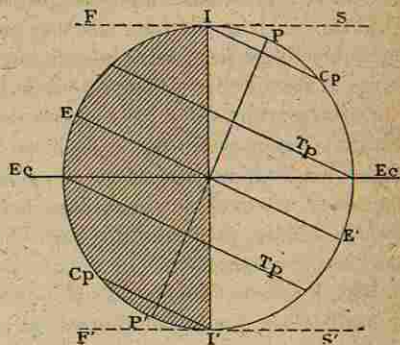


Fig. 1. — Effets de l'inclinaison de l'axe des pôles lors d'un solstice. — FS, F'S', limites du faisceau des rayons solaires; II', grand cercle d'illumination; Ec, écliptique; EE', équateur; Tp, tropiques; Cp, cercles polaires.

§ 2

RELIEF TERRESTRE

Éléments du relief terrestre. Répartition des terres et des mers. — Trois sortes d'éléments concourent à la formation de l'écorce du globe : l'élément *solide* ou *terre ferme*, l'élément *liquide* ou *océan*, l'élément *gazeux* ou *atmosphère*. L'atmo-

sphère constituée, autour des deux autres éléments, une couche régulière d'épaisseur inconnue, mais dont la partie inférieure a seule de l'intérêt pour le géologue, vu la rapidité avec laquelle l'air, au voisinage des hauts sommets, se raréfie et devient incapable d'effets mécaniques ou physiques.

Lorsqu'on jette les yeux sur une mappemonde, on ne peut manquer d'être frappé de l'inégale répartition de la terre et des mers. D'abord celles-ci l'emportent de beaucoup en étendue, car elles couvrent près des trois quarts de la superficie du globe. En outre, la majeure partie de la terre ferme est concentrée dans l'hémisphère boréal, où les masses continentales s'épanouissent, en quelque sorte, dans les latitudes moyennement élevées, tandis qu'elles n'envoient, dans l'hémisphère austral, que des prolongements de forme pointue. Inversement les océans, largement soudés au sud, se terminent en pointe dans le nord. Alors que le pôle boréal est occupé par une mer, à la vérité envahie par les glaces, c'est un continent qui, selon toute probabilité, surgit au pôle antarctique, où il sert d'appui à d'énormes banquises.

Cette opposition diamétrale des terres et des mers est si marquée, qu'en prenant pour pôle un point situé à peu de distance à l'ouest de Londres, on peut former un hémisphère où la superficie continentale serait égale à la superficie océanique, tandis que, dans l'autre, il y aurait plus de huit parties de mer pour une seule partie de terre. De plus, un vingtième seulement de la superficie continentale du premier hémisphère aurait, dans le second, ses antipodes représentés par de la terre ferme.

Enfin, d'un bout à l'autre du globe, dans l'hémisphère boréal, des golfes ou des mers intérieures (golfe du Mexique, Méditerranée, mer Rouge et golfe Persique, mers indiennes et polynésiennes) partagent en deux moitiés les masses continentales, comme s'il y avait eu dans l'écorce terrestre, à peu de distance de l'équateur, quelque cause de faiblesse, capable de déterminer par affaissement la formation d'un sillon presque continu.

Valeur du relief. Signification de l'aplatissement du globe. — Nulle part la surface de la terre ferme ne dépasse d'une grande quantité le niveau de l'Océan; car même les plus hautes montagnes (8800 mètres dans l'Himalaya) ne représen-

tent pas la sept-centième partie du rayon terrestre. Aussi est-il impossible de les rendre sensibles aux yeux sur un dessin à petite échelle de notre globe. Il y a d'ailleurs parité de valeur entre l'altitude de ces cimes culminantes et la plus grande profondeur des mers (8500 mètres dans le Pacifique). Si le relief des continents était uniformément réparti sur toute leur surface, l'altitude moyenne de la terre ferme serait d'environ sept cents mètres. Quant à la profondeur moyenne des mers, elle est d'un peu moins de quatre mille mètres, de telle sorte que le volume total de la masse océanique (en tenant compte des superficies réciproques) est égal à environ quinze fois celui des terres émergées. Néanmoins, si l'on réfléchit qu'une profondeur de 4000 mètres ne représente que la seize-centième partie du rayon terrestre, on aura le droit d'en conclure que, malgré son importance relative, la nappe océanique ne forme en réalité qu'une mince enveloppe au-dessus de la partie solide du globe, dont la surface diffère peu, par conséquent, de celle de l'Océan. D'ailleurs, en vertu des lois de l'équilibre d'une masse fluide soumise à un mouvement de rotation, la surface libre des mers, sollicitée par la force centrifuge, est aplatie au pôle et renflée à l'équateur, où elle fait, au-dessus d'un globe idéal supposé sphérique, une saillie évaluée à 21 kilomètres, soit à peu près un trois-centième du rayon.

Il résulte donc de la coïncidence signalée que la terre ferme, elle aussi, affecte une figure d'équilibre, et comme une telle figure est le privilège des corps fluides, cela donne une grande probabilité à l'hypothèse d'après laquelle notre globe aurait traversé un état initial de fluidité.

Complication des continents. — La répartition des détails du relief est aussi très intéressante à étudier. Il s'en faut de beaucoup que ce qu'on appelle un continent soit une unité homogène, où l'altitude croisse régulièrement depuis les rivages maritimes jusqu'à une partie centrale culminante, formant soit un massif, soit une arête allongée. C'est ce dont il est aisé de se rendre compte en consultant, non plus les anciennes cartes géographiques, où les lignes de relief étaient figurées très arbitrairement par des hachures de convention, mais les cartes *hypsométriques* des nouveaux atlas, où des courbes de niveau réunissent tous les

points de même altitude, en même temps que les zones d'égal relief moyen sont accusées par une teinte uniforme.

Si l'on procède ainsi pour l'Europe, par exemple, on verra que ce continent débute, dès le détroit de Gibraltar; par un plateau de 700 mètres d'altitude moyenne, le plateau ibérique, dont la partie culminante est justement appuyée au rivage méditerranéen, si bien que, pendant quelque temps, la *ligne de partage des eaux*, entre l'Atlantique et la Méditerranée, est obligée de suivre presque exactement ce rivage. Ensuite, cette ligne côtoie le bord oriental du plateau espagnol, jusqu'à ce qu'elle ait réussi à atteindre les Pyrénées, dont elle épouse la crête jusqu'à l'Ariège. Mais alors il faut que, par les Corbières, elle vienne errer, en quelque sorte, dans la dépression par laquelle le bassin atlantique se relie sans difficulté avec celui de la Méditerranée. Quand elle a franchi le col, elle voit la masse des Cévennes se dresser au-devant d'elle; mais c'est moins une chaîne proprement dite que le bord extrême et culminant du plateau central de la France, grand massif haut de 600 mètres en moyenne et se relevant de plus en plus vers l'est. La ligne de partage en suit le bord et continue de là jusqu'en Lorraine, non pour atteindre la crête des Vosges, mais pour passer, au pied de ces montagnes, dans un col qui la conduit enfin au Jura. Mais à peine a-t-elle suivi quelque temps le faite de cette chaîne qu'elle descend brusquement dans l'insignifiante dépression qui sépare le lac de Genève de celui de Neuchâtel, c'est-à-dire le bassin de la Méditerranée de celui de la mer du Nord.

Alors seulement la ligne de partage pénètre dans les grandes Alpes, mais pour les abandonner bien vite et chercher, comme à l'aventure, un chemin mal défini entre le lac de Constance et le Danube; après quoi son parcours continue, capricieux et compliqué, au sud de la Franconie et de la Bohême, et trouve tout juste un passage entre la source de l'Oder et les affluents du Danube. Puis, ayant longé les Carpathes, elle vient définitivement s'évanouir dans le grand plateau russe, au milieu de ces marécages où, suivant l'abondance ou la direction des pluies, l'eau pourrait s'écouler tantôt dans la Baltique, tantôt dans la mer Noire. Pendant ce temps, le grand arc formé par les Alpes,

les monts de Bohême et les Carpathes enferme, en quelque sorte, les eaux danubiennes dans le bassin plat de la Hongrie, où elles pénètrent en forçant un véritable défilé, pour s'échapper à l'autre bout par une coupure plus étroite encore, celle des Portes de Fer.

Ainsi, au lieu d'un relief central nettement défini, envoyant à droite et à gauche des contreforts, comme des membres qui se détachent d'un tronc commun, nous voyons partout des massifs largement étalés, ou des bassins plats qu'entourent de hautes chaînes, souvent rompues par les cours d'eau aux points où il semble qu'il ait dû être le plus difficile de les franchir. En résumé, le continent européen s'offre à nous comme un ensemble compliqué, morcelé, portant la trace évidente de mille actions successives, et l'on devine que ses traits particuliers, souvent contradictoires, ne peuvent se justifier que par la connaissance de la série des événements antérieurs; absolument comme l'histoire de la formation d'un peuple peut seule donner la clef de ses particularités physiques et morales, dont chacune est un héritage du passé.

Situation des lignes de relief; sa signification. — Il faut ajouter que rarement on observe un passage graduel entre les plaines et les montagnes. Comme les Pyrénées au-devant de la plaine aquitanaise, comme le Jura en face de la plaine suisse, les Alpes en face de la plaine lombarde, les monts Scandinaves devant la mer du Nord, l'Himalaya au nord du plateau indien, etc., les montagnes surgissent d'ordinaire brusquement, sous la forme de chaînes alignées dont un versant est en général plus raide que l'autre. De plus, au lieu de se trouver au milieu des continents, elles en occupent plus souvent les bords, faisant directement face, soit à l'océan, soit à une dépression marquée.

Ainsi la Sierra Nevada, la chaîne la plus élevée de l'Espagne, est en quelque sorte collée contre le rivage méditerranéen. Les Pyrénées, si progressivement préparées du côté espagnol, se dressent comme une muraille abrupte en face de la dépression aquitanaise. Le Jura est formé d'une série de chaînons parallèles d'altitude croissante, dont le plus élevé domine comme une falaise la plaine suisse. Le plateau central de la France, si doucement incliné vers l'ouest, se relève constamment, comme

nous l'avons déjà dit, à l'est, où son bord forme la chaîne des Cévennes, surgissant brusquement au-dessus de la dépression où coule le Rhône.

La même loi gouverne le relief du fond des mers. Les îles, qui ne sont autre chose que les sommets de montagnes en partie submergées, forment aussi des chaînes, aux versants assez abrupts, limitant des portions déprimées du lit de l'océan. Telles sont les Antilles, les Aléoutiennes et la plupart des îles de la Polynésie. Si les portions que ces chaînes entourent venaient à se soulever en masse, la terre ferme s'enrichirait de nouveaux territoires, limités par des bourrelets montagneux, et en tout semblables à ces plaines de l'Asie, dont le fond est occupé par des lacs sans écoulement, tandis que les hautes chaînes de l'Himalaya, du Kuen-Lun et du Thian-Chian en définissent les limites.

Une telle similitude de constitution semble autoriser l'idée d'une commune origine, d'autant plus que les lacs des dépressions continentales se révèlent, par leur salure, comme d'anciens bassins maritimes. Par là on se trouve conduit à penser que la formation de la terre ferme a dû être progressive, chaque continent s'agrandissant par l'émergence des fonds de mers voisins. De cette manière, toute la surface terrestre pourrait être comparée à une sorte de marqueterie, composée de compartiments plats, dont le centre aurait fléchi, tandis que des dislocations d'allure rectiligne en relevaient brusquement les bords.

Mais avant de voir jusqu'à quel point cette conception est justifiée par la structure intime de l'écorce, il importe de poursuivre l'examen des formes actuelles du globe, en étudiant la répartition des conditions physiques à sa surface.

§ 3

RÉPARTITION DE LA TEMPÉRATURE

Zones de climats; leur irrégularité. — Nous avons déjà dit comment les données astronomiques relatives à notre planète déterminaient, avec la succession du jour et de la nuit, le jeu régulier des saisons. Ces mêmes conditions, en tenant compte

de l'obliquité plus ou moins grande des rayons solaires, occasionnent le partage de chaque hémisphère en trois zones : la zone *torride*, où la durée du jour diffère peu de celle de la nuit, et dont chaque point voit une fois par an le soleil au zénith; la zone *tempérée*, où les étés aux longs jours alternent avec les hivers aux longues nuits; enfin la zone *glaciale*, dont le climat trouve sa suprême expression au pôle, dans cette nuit de six mois qui succède à un jour d'égale durée, mais pendant lequel le soleil n'envoie que des rayons rasants.

Si la surface du globe offrait partout une égale distribution des deux éléments, liquide et solide, rien ne troublerait l'uniformité des zones de climats. Chacune d'elles s'étendrait sans irrégularités d'une extrémité du monde à l'autre, et les lignes menées par tous les points de la terre en possession d'une même température moyenne annuelle, c'est-à-dire les *isothermes*, seraient partout des cercles, exactement parallèles à l'équateur.

Il n'en est pas ainsi, et cela pour plusieurs raisons. D'une part, à mesure qu'on s'élève, l'air se raréfie, devient plus sec et est de moins en moins apte à absorber la chaleur solaire pour en faire profiter les corps qu'il baigne, perdant ainsi, dans nos régions, à peu près un degré centigrade par 170 mètres. Par suite, les districts continentaux de grande altitude ont une température notablement inférieure à celle qui règne, au niveau de la mer, sur le même parallèle de latitude. D'autre part, la terre ferme s'échauffe et se refroidit plus vite que la mer, ce qui introduit, à latitude égale, une différence sensible entre l'intérieur des continents et leurs rivages. Enfin, dans les pays sujets aux chutes de neige, le blanc manteau qui en hiver séjourne sur le sol paralyse, à l'égard de ce dernier, l'action bienfaisante du soleil. Aussi, dans ces contrées, la terre ferme agit-elle en *exagérant* les différences entre l'hiver et l'été, tandis que, sur l'océan et dans son voisinage immédiat, l'élément liquide intervient au contraire comme un *régulateur*, absorbant à l'état latent une partie de la chaleur du jour ou de l'été, pour la restituer ensuite, par le mécanisme de la condensation, dans la nuit ou pendant la saison froide. De là vient qu'il y a des îles, comme Madère, où règne une température à peu près exempte de tous autres changements que les variations diurnes,

alors que certains pays continentaux, tels que l'intérieur de la Russie, voient, dans le cours d'une année, la température moyenne mensuelle s'élever ou s'abaisser de *vingt-cinq à trente degrés*.

Rôle des courants. — Ce n'est pas tout. Lorsque, dans une masse fluide, que ce soit l'air ou l'eau, des différences de température se produisent, il s'établit aussitôt des courants, *courants atmosphériques* et *courants marins*, qui tendent à rétablir l'équilibre. Si quelques-uns de ces courants, ceux qui règnent dans la zone équatoriale, sont à peu près indépendants de la répartition des terres et des mers, il en est autrement dans les latitudes tempérées, où l'influence exercée par les continents sur le transport des masses fluides (influence qui parfois change avec les saisons) est souvent assez forte pour modifier profondément les conditions normales du climat. Par exemple, le *Gulf-stream*, ce fleuve d'eau chaude issu du Golfe du Mexique, où les eaux de l'Atlantique, poussées par les vents d'est, se concentrent et s'échauffent comme dans une vaste chaudière, pour s'échapper ensuite avec une grande vitesse par le détroit de Bahama, le *Gulf-stream*, disons-nous, adoucit considérablement le climat de l'Europe septentrionale. Au contraire, certains courants froids, qui longent les côtes américaines, y contre-balancent en quelques points l'effet d'une température tropicale. De même il y a des courants d'air sec assez puissants pour assujettir au régime des déserts jusqu'à certaines îles situées en plein océan.

§ 4

RÉPARTITION DE LA VIE

Variété des formes vitales. — Par suite des différences qui viennent d'être signalées, le globe tel qu'il est aujourd'hui, c'est-à-dire pourvu d'un relief très inégal et d'une grande complication dans les contours océaniques, offre une extrême variété de conditions physiques. Et comme ces conditions, degré de chaleur, variations plus ou moins brusques ou plus ou moins étendues de la température, abondance plus ou moins grande

de l'humidité, etc., sont ce qui influe par-dessus tout sur le monde organique, animal ou végétal, la vie revêt à la surface des continents, comme dans les mers, une infinie variété de formes. Le monde se partage donc en *provinces, botaniques* ou *zoologiques*, les unes *terrestres*, les autres *marines*, dont chacune est caractérisée par un ensemble de formes qui lui sont propres.

Faunes marines littorales; faune abyssale. — Toutefois, en ce qui concerne les animaux marins, cette diversité organique ne se manifeste que sur les espèces de surface, celles qui vivent près du rivage, composant ce qu'on appelle les *faunes littorales*. Tout autre est la population des grandes profondeurs, au-dessous d'une couche superficielle peu épaisse, qui seule ressent les variations de la chaleur extérieure. Là règne une température uniforme qui, dans les océans largement ouverts, est voisine de zéro, parce que l'eau froide des pôles, plus lourde, descend et afflue librement sur le fond. Dans ce milieu exempt de toute agitation, où la lumière du soleil ne pénètre pas, une faune spéciale se développe, indépendante des latitudes; c'est la faune des abîmes ou *abyssale*, aussi monotone que les faunes littorales sont riches et variées.

Un tel contraste est frappant et sa signification s'accroît encore, quand le zoologiste nous apprend à reconnaître, parmi les formes abyssales, bon nombre de types étroitement alliés à des espèces disparues, qu'on ne retrouve plus qu'à l'état fossile. C'est une raison pour penser que la diversité actuelle des conditions extérieures n'a pas toujours existé et qu'elle n'a cessé de se prononcer durant le cours des âges, pour atteindre, avec l'époque où nous sommes, son plus haut degré de complication.

Espèces isolées, espèces disjointes. Conclusion. — En tout cas, les faunes et les flores de surface du temps présent abondent en espèces *isolées*, c'est-à-dire dépourvues de tout lien avec les types organiques contemporains, au milieu desquels elles semblent dépayées, tandis qu'elles forment la suite naturelle et comme le dernier anneau d'une chaîne d'antécédents fossiles. Quand de ce fait on rapproche celui des espèces *disjointes*, c'est-à-dire cantonnées aujourd'hui dans des districts déterminés,

sans qu'on en observe aucune trace dans les régions intermédiaires, il devient difficile d'échapper à cette conclusion : que le monde actuel n'est pas une unité homogène; que les groupes organiques, aussi bien que les détails du relief, y sont loin d'avoir tous la même antiquité; en un mot, que l'état de choses au milieu duquel nous vivons est la *résultante* d'une longue suite de transformations, dont chacune a laissé à la surface une empreinte plus ou moins reconnaissable.

Par quel mécanisme ces transformations se sont-elles effectuées? C'est ce que nous pouvons espérer de découvrir, en dirigeant notre attention vers les changements dont nous sommes chaque jour témoins.

CHAPITRE II

DYNAMIQUE TERRESTRE EXTERNE

§ 1

DÉFINITION DE LA DYNAMIQUE TERRESTRE

Stabilité apparente des formes du globe. — Quand on jette un coup d'œil sommaire sur le monde qui nous entoure, la première impression qui s'en dégage semble être celle de la *stabilité* des formes et des conditions extérieures.

Le paysage autour de nous demeure immuable, ne subissant d'autres changements que ceux dus à la culture ou aux constructions élevées de main d'homme. Les contours déchiquetés des aiguilles des Alpes sont absolument tels que les a dessinés Saussure, et si l'histoire des montagnes a plus d'une fois enregistré des éboulements considérables, l'importance de ces phénomènes paraît négligeable, à côté de la masse qu'ils ne modifient que par d'insignifiants détails. A peine remarque-t-on, sur

certain points, une différence entre les rivages maritimes actuels et ceux dont les anciens géographes nous ont transmis la description. Chaque année les mêmes époques ramènent des conditions identiques de température. Enfin, si la tradition nous parle de changements survenus à la longue dans le climat de quelques contrées, tantôt l'intervention de l'homme suffit à les expliquer, tantôt il paraît légitime d'y voir des modifications passagères, produites par des causes périodiques, dont le retour régulier doit provoquer la répétition indéfinie des mêmes phénomènes.

Universalité des actions dynamiques. — Cependant cette impression n'est qu'une trompeuse apparence, qui tient à la brièveté de la vie humaine, comparée à la lenteur des changements en voie d'accomplissement. Tout se meut autour de nous, même dans les milieux qui semblent le plus inactifs. Partout les forces mécaniques, physiques et chimiques sont à l'œuvre, modifiant les conditions de l'écorce pour produire à chaque instant de nouveaux états d'équilibre, bientôt destinés à disparaître pour faire place à d'autres. Deux catégories de forces ou *agents dynamiques* s'emploient à cette transformation; les unes sont extérieures à notre globe et forment ce que nous appellerons le jeu de la *dynamique terrestre externe*; les autres ont leur siège dans les profondeurs de l'écorce et leur ensemble constitue la *dynamique terrestre interne*. Il convient d'examiner l'un après l'autre ces deux ordres de faits.

Principe fondamental de la dynamique externe. — Le principe essentiel de la dynamique externe réside dans la *chaleur solaire*. C'est cette chaleur qui vaporise l'eau des océans et la fait passer à l'état de vapeur dans les masses atmosphériques, d'où elle se précipite en pluie sur la terre ferme, entraînant sur son passage tous les matériaux meubles qu'elle peut déplacer. C'est elle qui fait naître les vents et lance à l'assaut des rivages les vagues de la mer. C'est elle enfin qui permet, à la surface du globe, l'accomplissement des réactions de toute nature, par lesquelles la consistance et la composition de l'écorce superficielle sont incessamment modifiées.

D'une manière générale, on peut donner de la dynamique externe la définition suivante : c'est la *réaction exercée sur l'écorce*

sans qu'on en observe aucune trace dans les régions intermédiaires, il devient difficile d'échapper à cette conclusion : que le monde actuel n'est pas une unité homogène; que les groupes organiques, aussi bien que les détails du relief, y sont loin d'avoir tous la même antiquité; en un mot, que l'état de choses au milieu duquel nous vivons est la *résultante* d'une longue suite de transformations, dont chacune a laissé à la surface une empreinte plus ou moins reconnaissable.

Par quel mécanisme ces transformations se sont-elles effectuées? C'est ce que nous pouvons espérer de découvrir, en dirigeant notre attention vers les changements dont nous sommes chaque jour témoins.

CHAPITRE II

DYNAMIQUE TERRESTRE EXTERNE

§ 1

DÉFINITION DE LA DYNAMIQUE TERRESTRE

Stabilité apparente des formes du globe. — Quand on jette un coup d'œil sommaire sur le monde qui nous entoure, la première impression qui s'en dégage semble être celle de la *stabilité* des formes et des conditions extérieures.

Le paysage autour de nous demeure immuable, ne subissant d'autres changements que ceux dus à la culture ou aux constructions élevées de main d'homme. Les contours déchiquetés des aiguilles des Alpes sont absolument tels que les a dessinés Saussure, et si l'histoire des montagnes a plus d'une fois enregistré des éboulements considérables, l'importance de ces phénomènes paraît négligeable, à côté de la masse qu'ils ne modifient que par d'insignifiants détails. A peine remarque-t-on, sur

certain points, une différence entre les rivages maritimes actuels et ceux dont les anciens géographes nous ont transmis la description. Chaque année les mêmes époques ramènent des conditions identiques de température. Enfin, si la tradition nous parle de changements survenus à la longue dans le climat de quelques contrées, tantôt l'intervention de l'homme suffit à les expliquer, tantôt il paraît légitime d'y voir des modifications passagères, produites par des causes périodiques, dont le retour régulier doit provoquer la répétition indéfinie des mêmes phénomènes.

Universalité des actions dynamiques. — Cependant cette impression n'est qu'une trompeuse apparence, qui tient à la brièveté de la vie humaine, comparée à la lenteur des changements en voie d'accomplissement. Tout se meut autour de nous, même dans les milieux qui semblent le plus inactifs. Partout les forces mécaniques, physiques et chimiques sont à l'œuvre, modifiant les conditions de l'écorce pour produire à chaque instant de nouveaux états d'équilibre, bientôt destinés à disparaître pour faire place à d'autres. Deux catégories de forces ou *agents dynamiques* s'emploient à cette transformation; les unes sont extérieures à notre globe et forment ce que nous appellerons le jeu de la *dynamique terrestre externe*; les autres ont leur siège dans les profondeurs de l'écorce et leur ensemble constitue la *dynamique terrestre interne*. Il convient d'examiner l'un après l'autre ces deux ordres de faits.

Principe fondamental de la dynamique externe. — Le principe essentiel de la dynamique externe réside dans la *chaleur solaire*. C'est cette chaleur qui vaporise l'eau des océans et la fait passer à l'état de vapeur dans les masses atmosphériques, d'où elle se précipite en pluie sur la terre ferme, entraînant sur son passage tous les matériaux meubles qu'elle peut déplacer. C'est elle qui fait naître les vents et lance à l'assaut des rivages les vagues de la mer. C'est elle enfin qui permet, à la surface du globe, l'accomplissement des réactions de toute nature, par lesquelles la consistance et la composition de l'écorce superficielle sont incessamment modifiées.

D'une manière générale, on peut donner de la dynamique externe la définition suivante : c'est la *réaction exercée sur l'écorce*

solide, à la faveur de la chaleur du soleil, par les éléments fluides extérieurs, atmosphère, océan et eaux courantes. Par l'effet de cette réaction, les matériaux de la terre ferme perdent leur cohésion et retombent sous l'action de la pesanteur, qui les met en mouvement jusqu'à ce qu'ils aient conquis une meilleure situation d'équilibre, en se rapprochant du centre commun d'attraction.

§ 2

ACTION DE L'ATMOSPHÈRE

Désagrégation des roches. Dunes. — Sous l'influence des variations de la température et, mieux encore, par suite des alternatives de sécheresse et d'humidité, la surface du sol, même lorsqu'elle est rocheuse, se désagrège, éclate et se réduit en menus fragments, que le vent devient capable de déplacer. Quand ces fragments sont formés d'une matière suffisamment dure pour pouvoir, au delà d'un certain degré de division, résister à l'usure (ce qui est le cas des sables à grains de quartz), les courants atmosphériques les ballottent, jusqu'à ce qu'ils les aient amoncelés dans des vallées ou des dépressions à fond plat. A partir de ce moment, si le climat est assez sec pour que la pluie ne les entraîne pas, le vent se contente de remanier la superficie de ces accumulations, en y faisant naître une multitude de monticules instables qu'on appelle des *dunes*. Dans le Sahara, les dunes peuvent atteindre 200 mètres de hauteur et leur mobilité est justement redoutée par les caravanes. Les sables y sont siliceux et d'un grain remarquablement uniforme.

Les plateaux sur lesquels les grains quartzeux doivent cheminer avant d'arriver aux dunes prennent un poli caractérisé et, dans les défilés, le sable en mouvement burine les roches et parvient quelquefois à y creuser de vrais sillons.

Dunes maritimes. — Des dunes se forment aussi sur les rivages de la mer, quand la côte est plate, que le jeu de la marée est sensible et que le vent du large soulève les sables de la plage, desséchés à mer basse par les rayons du soleil, pour les accumuler en monticules à la faveur du moindre obstacle.

Il peut sembler, au premier abord, que ces *dunes maritimes* échappent à la formule générale de la dynamique externe; car elles résultent d'un travail opposé à l'action de la pesanteur. Mais, d'une part, le déplacement que subissent les sables, soit en distance, soit en hauteur, est toujours peu considérable et, d'autre part, ce qu'il importe de ne pas méconnaître, c'est le rôle protecteur que jouent les barrières de sable, en limitant l'action de la vague et en empêchant la mer de pénétrer, lors des grandes marées, sur la portion de l'ancien rivage abritée par ce *cordon littoral* de dunes. Cette portion, auparavant exposée à d'incessants remaniements, est désormais défendue contre toute destruction. Son sol se consolide; ses dépressions se comblent et se colmatent peu à peu par l'apport des cours d'eau voisins, et ainsi la terre ferme, c'est-à-dire l'élément stable, reçoit un nouvel accroissement, profitable à la cause générale de l'équilibre.

Lorsque les dunes maritimes ont atteint une hauteur assez grande pour que la force du vent ne permette plus aux grains de sable d'en franchir la crête, elles deviennent à peu près stables et peuvent être définitivement fixées par la végétation. Le phénomène des dunes n'est donc pas permanent et son développement, en chaque point, dépend du temps qui a pu s'écouler depuis l'établissement des rapports actuels de la terre ferme et de l'océan.

En outre il convient de remarquer que les dunes, maritimes ou continentales, étant l'œuvre du vent, leur formation est nécessairement intermittente; car une seule tempête peut y apporter plus de changements qu'une longue suite de jours ordinaires.

§ 3

ACTION DES EAUX COURANTES

Principe des précipitations atmosphériques. — Le travail de désagrégation que produisent les influences atmosphériques ne donne naissance à des dunes que quand le vent est particulièrement fort ou que la sécheresse du climat est exceptionnelle.

En tout autre cas, ce travail a surtout pour effet d'ameublir l'écorce solide et, par là, de la rendre accessible à l'action des eaux courantes, l'instrument de beaucoup le plus efficace de la dynamique externe.

Le principe de cette action réside dans les *précipitations atmosphériques*, c'est-à-dire dans la condensation de la vapeur répandue au sein de l'atmosphère. L'air qui s'est chargé de vapeur d'eau au-dessus des mers tropicales est emporté par les courants atmosphériques vers des latitudes plus hautes; ou encore, après s'être saturé au niveau de l'océan, il est contraint, par la direction du vent, de s'élever pour franchir une chaîne de hauteurs. Dans l'un comme dans l'autre cas, il subit un refroidissement plus ou moins notable et, comme la quantité de vapeur qui peut exister dans l'air dépend de la température, tout ce qui, à un moment donné, dépasse le maximum admissible, doit se *précipiter*, sous la forme de *pluie* ou de brouillard si l'air est au-dessus de zéro, sous celle de *neige* ou de givre s'il est au-dessous. Laissant de côté, pour y revenir bientôt, la part des neiges, occupons-nous de ce que devient le produit des pluies.

Chutes de pluie. — L'intensité de la pluie est essentiellement variable suivant les régions. En moyenne, il tombe en Europe, chaque année, 573 millimètres d'eau dans les plaines et 1300 millimètres dans les districts montagneux. La chute de pluie s'élève à deux mètres le long de la côte de Norvège. Mais c'est bien autre chose sur le flanc méridional de l'Himalaya, où certaines localités reçoivent jusqu'à *quinze mètres* d'eau par an.

Ces différences ne tiennent pas seulement à l'inégale richesse en vapeur d'eau des courants d'air et au refroidissement que ceux-ci éprouvent au contact des montagnes. Une grande part de l'effet produit est due au relief lui-même et au travail que l'air est obligé d'accomplir pour franchir les chaînes qui lui barrent le passage. En s'élevant l'air se dilate; par ce seul fait, en vertu des lois de la physique, il perd une notable quantité de chaleur, ce qui entraîne une condensation correspondante de vapeur. De cette manière, la pluie est d'autant plus abondante que l'obstacle opposé aux vents humides est à la fois plus

élevé et plus brusque. Ainsi le relief antérieurement acquis par le sol n'agit pas seulement sur la direction des courants d'air et sur leur richesse en humidité; il influe aussi d'une manière remarquable sur l'abondance des pluies et, par contre-coup, sur la puissance mécanique des cours d'eau qui en résulteront.

On évalue aujourd'hui à environ 120 000 kilomètres cubes la quantité de précipitations atmosphériques que reçoit chaque année la terre ferme. Régulièrement étalée sur cette dernière (dont la superficie est de 143 millions de kilomètres carrés), cette quantité formerait une couche d'eau de 844 millimètres d'épaisseur.

Partage du produit des pluies. Ruissellement. Érosion.

— Une partie de la pluie qui tombe retourne immédiatement dans l'atmosphère par *évaporation*. Ce facteur, d'une efficacité très variable suivant les saisons et les latitudes, suffit, dans les régions tempérées, pour enlever chaque année entre les deux tiers et les trois quarts de la pluie tombée.

Le reste *s'infiltré* dans le sol, si ce dernier est *perméable*, ou *ruisselle* à la surface, si le terrain est *imperméable* ou encore si la pente est trop forte.

L'eau courante possède un pouvoir mécanique qui dépend à la fois de sa masse et de sa vitesse, cette dernière étant déterminée par la pente. Elle excelle à entraîner les matériaux meubles et à remanier les roches solides que la gelée et la sécheresse ont préalablement réduites en fragments, soit en y ouvrant des fentes de retrait, soit en élargissant les fissures naturelles. Aussi, dans beaucoup de pays, le terrain subit-il, par l'action prolongée des pluies, une *érosion* qui donne lieu à des apparences remarquables, piliers isolés, arcades naturelles, pyramides de terre (fig. 2), etc. Avec les sables dont certaines parties sont agglomérées en grès, l'isolement des blocs de grès, par entraînement du sable environnant, et leur chute sur les flancs des vallées, font naître des paysages pittoresques, dont la forêt de Fontainebleau offre un exemple bien connu.

Torrents. — Le ruissellement s'exerce avec une intensité particulière dans les pays de montagnes, où le sol se montre partout sillonné de ravinelements.

Lorsque le terrain est disposé de manière à faire converger

vers un même point de nombreuses rigoles, leur réunion donne naissance à un *torrent*. C'est un cours d'eau violent, mais éphémère, très souvent à sec, mais capable de débiter en quelques heures une masse d'eau comparable à celle des fleuves,



Fig. 2. — Arcade naturelle et pyramides d'érosion dans le bassin du Rio Grande (d'après Hayden).

avec une vitesse qui la rend apte aux plus grands effets mécaniques. Les eaux torrentielles, concentrées dans un bassin de réception en forme de cirque, s'écoulent d'habitude par un étroit couloir, dont elles ne cessent de dégrader les parois, tant par leur choc que par celui des matériaux qu'elles déplacent en provoquant de nombreux éboulements. Mais leur vitesse s'amortit subitement au débouché du couloir dans la vallée principale, et alors les matières solides charriées par le torrent

se déposent en formant un amas conique plus ou moins confus, mélange de blocs anguleux, de galets, de graviers et de boues, qu'on nomme *cône de déjection* (fig. 3). Ainsi tout torrent se compose de trois parties : l'une supérieure, où se fait sentir l'érosion produite par les *eaux sauvages*; la seconde, moyenne, où domine l'affouillement, œuvre du cours d'eau concentré dans son couloir; la troisième, inférieure, région de dépôt, où le torrent édifie un cône avec les matériaux qu'il a entraînés.

A mesure que le cône s'allonge, le torrent se ménage à la surface un lit variable.

Mais les progrès de l'affouillement, joints à l'allongement du cône, ont pour effet de réduire peu à peu la pente du cours d'eau et, par suite, de diminuer sa puissance mécanique. Aussi tout torrent laissé à lui-même arrive-t-il, au bout d'un temps plus ou moins long, à une sorte d'é-

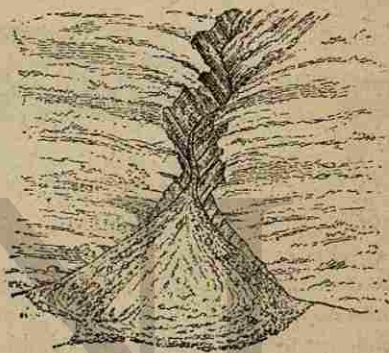


Fig. 3. — Cône de déjection torrentiel.

quilibre, qui permet à la végétation de prendre possession de ses rives. Tandis que les arbres consolident le sol par leurs racines, l'herbe oblige l'eau des pluies à s'écouler par mille filets sans pouvoir se concentrer. Le travail d'érosion s'arrête et le torrent est fixé. Du moins, dans son existence éphémère, a-t-il contribué à faire arriver dans les vallées, c'est-à-dire dans une situation d'équilibre plus stable, des matériaux que la pesanteur seule n'eût jamais réussi à y ramener.

D'ailleurs cette action aura été essentiellement intermittente, ne s'exerçant que lors des grandes pluies et toujours pendant un temps très court, dont la brièveté contraste avec l'intensité des effets produits.

Deltas torrentiels. — Lorsqu'un torrent débouche dans un lac, sa vitesse étant immédiatement amortie, les cailloux et

graviers tombent dès l'embouchure et se stratifient en formant un talus plus ou moins raide. Par suite des progrès de ce talus, les couches inclinées de gravier vont s'ajoutant les unes aux autres en continuant à empiéter sur le lac. Mais les plus gros blocs, moins faciles à entraîner, se déposent, un peu avant l'embouchure, sur la crête du talus, laquelle s'avance aussi progressivement. Ainsi se constitue un amas de graviers en couches inclinées, avec couronnement horizontal de cailloux roulés, qu'on appelle *delta torrentiel* (fig. 4). Le cordon de gros

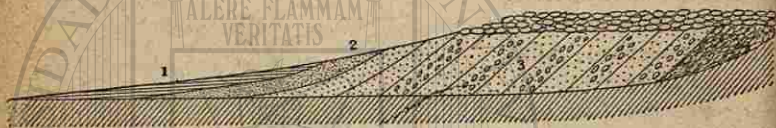


Fig. 4. — Coupe d'un delta torrentiel. — 1, limon; 2, sable fin; 3, graviers; 4, couronnement de galets.

cailloux indique avec certitude le niveau du lac au moment de la formation de ce delta.

Rivières des bassins imperméables. Phénomènes d'affouillement. — Si, en raison de la pente du sol, le ruissellement est général dans les montagnes, il s'exerce aussi d'une façon normale dans les pays peu accidentés, toutes les fois que le sol est *imperméable*, ce qui est le cas des roches argileuses. Privée de la faculté de s'infiltrer, l'eau ruisselle à la surface, creusant partout, lors des averses, des rigoles dont elle dégrade les bords. En quelques heures, le produit des pluies parvient aux cours d'eau principaux et occasionne le débordement, violent et rapide, d'une eau limoneuse.

Les rivières soumises à ce régime, ainsi que les cours d'eau dont la pente, sans être celle d'un véritable torrent, est assez sensible pour donner à l'eau une vitesse suffisante, exercent sur leurs versants une action mécanique appréciable, creusant leur lit, comme les torrents, jusqu'à ce que l'excès de pente ait disparu. Ce travail d'*érosion* et d'*affouillement*, lorsque la rivière dispose, jusqu'à son embouchure, d'une grande hauteur totale de chute, fait naître à la longue des gorges profondes, dont le type est réalisé dans les célèbres *Cañons* du Colorado

(fig. 5), véritables gouffres aux parois quelquefois verticales sur un millier de mètres de hauteur.

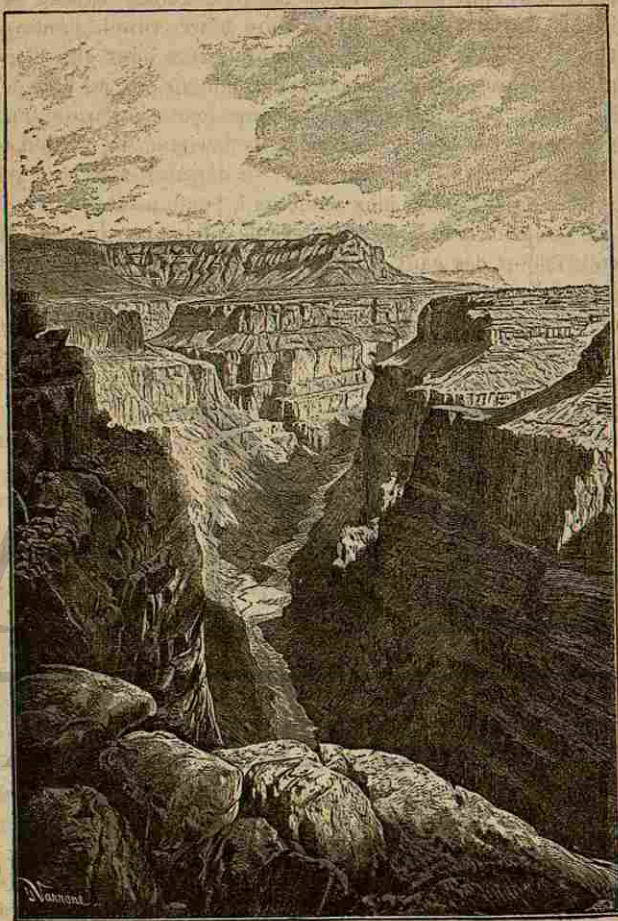


Fig. 5. — Le grand Cañon du Colorado.

Il importe de remarquer que l'affouillement produit par les rivières n'est en rien comparable au travail de la goutte d'eau qui creuse la pierre par ses chocs répétés. La division des

roches a été préparée de longue date par les cassures naturelles, les fentes de retrait, les infiltrations, la gelée, etc. L'eau courante se contente de *débiter* les roches ainsi divisées et de les faire écrouler en emportant leurs débris. Si elle creuse son lit, c'est en raison de la hauteur de chute dont elle dispose entre sa source et son embouchure, hauteur qui, au lieu de se répartir sur toute la longueur par une pente uniforme, tend à se concentrer le plus près possible de l'origine du cours d'eau, jusqu'à ce que le principal effort se dépense dans une seule cascade, précédant un long parcours à pente insensible.

De temps en temps, la rencontre de quelque roche plus dure arrête l'effort des eaux, qui se précipitent par-dessus en *cataractes*, *cascades* ou *rapides*, en attendant qu'elles aient réussi à emporter définitivement l'obstacle. Souvent cet arrêt momentané détermine, en amont du barrage, la formation d'un lac où les affluents latéraux viennent verser des deltas torrentiels. Plus tard, quand le barrage est rompu, les lacs se vident, laissant à découvert, sous forme de *terrasses*, les graviers ainsi déposés.

Rivières divagantes. — Pendant le progrès du creusement, l'impétuosité des eaux ne leur permet pas de suivre un chenal constant et la vallée prend toute la largeur que comportent le débit habituel et les déplacements du cours d'eau. Une fois la pente réduite, une nouvelle phase commence et la rivière devient *divagante*, c'est-à-dire que, insuffisante pour occuper habituellement toute la largeur de son ancien lit ou *lit majeur*, elle s'y trace un lit moins large ou *lit mineur*, dont la situation dans la vallée est instable. Cette instabilité persiste jusqu'à ce que, par les méandres de son lit mineur, la rivière ait *allongé son parcours*, assez pour que, en moyenne, la résistance offerte au mouvement par le frottement du fond soit égale à la force du courant. Alors la rivière devient stable.

Quand un cours d'eau a cessé de divaguer, on dit qu'il est à l'*état de régime*. Son lit ne subit plus que des déplacements insignifiants et les eaux ne le dépassent que lors des crues, dont la fréquence et l'intensité varient d'ailleurs avec l'abondance des pluies, le degré d'imperméabilité du terrain et le caractère particulier des affluents.

Alluvionnement. — Le propre d'une rivière divagante est d'attaquer les parties concaves de ses rives, contre lesquelles l'eau des crues vient se briser, et de les faire ébouler par portions. Mais sur les rives convexes et dans les remous, au contraire, la vitesse s'amortit et les produits de l'éboulement se déposent en formant des *alluvions*. Sans cesse remaniés lors des changements de lit, les matériaux de ces alluvions, qui sont des cailloux, des graviers, des sables et des limons, cheminent de proche en proche vers l'aval, et les plus gros, arrondissant constamment leurs angles par frottement mutuel, deviennent des *cailloux roulés*.

C'est lors des crues que se déposent les alluvions des cours d'eau. Les cailloux et graviers tombent les premiers, au sein d'une eau qui conserve encore une vitesse sensible, et tendent ainsi à former, à peu de distance du lit habituel, des bourrelets où les matériaux sont souvent en couches inclinées. La grosseur des éléments y varie beaucoup, suivant la force des débordements successifs. Les sables vont plus loin, et se déposent dans les eaux plus tranquilles, ce qui permet quelquefois la conservation des fragiles coquilles des mollusques d'eau douce. Quant au limon, c'est un produit impalpable, tombé dans une eau sans vitesse, au moment où les eaux débordées vont rentrer dans leur lit. Souvent on y peut distinguer trois couches : l'une, inférieure, un peu mélangée de menu sable; l'autre, moyenne, qui est le vrai limon, formé de très petits grains siliceux et de silicate d'alumine ferrugineux; la troisième, charbonneuse, résultat du dépôt et de la décomposition sous l'eau des matières végétales, que la rivière charrie encore lorsqu'elle ne peut plus transporter de fragments minéraux.

Conditions du transport des cailloux et graviers. — Pour qu'un cours d'eau transporte des pierres de la grosseur d'un œuf, il faut que sa vitesse au fond soit au moins égale à 1 m. 20 par seconde. La Seine, même en temps de crue, n'atteint jamais ce chiffre et ne peut par conséquent déplacer que du petit gravier.

Cette observation est très importante; car le fond de la Seine (aussi bien d'ailleurs que celui de tous les cours d'eau principaux aujourd'hui à l'état de régime) est tapissé par une

nappe, épaisse de plusieurs mètres, de gros cailloux roulés. Non seulement la rivière est maintenant impuissante à déplacer les matériaux de cette nappe; mais, quelque augmentation qu'on imagine pour le débit de ses crues, il est impossible que la vitesse sur le fond en reçoive assez d'accroissement pour mettre les gros cailloux en mouvement. Une augmentation momentanée de la pente pourrait seule produire ce résultat. Par suite, on peut affirmer que de telles rivières ont traversé, avant l'état actuel, une période où les relations mutuelles de niveau, entre la terre ferme et l'océan, n'étaient pas ce qu'elles sont de nos jours.

Variabilité de l'action des cours d'eau. — Ainsi tout cours d'eau a son histoire, plus ou moins compliquée suivant l'étendue et la composition de son bassin. Non seulement cette histoire a des phases bien distinctes, mais, dans chacune d'elles, l'activité dynamique du cours d'eau est intermittente, comme celle du vent ou des vagues de la mer. Ce n'est que dans les périodes de crues qu'une rivière, même divagante, dépose ou remanie sensiblement ses alluvions. Or le retour des crues est très capricieux; des années entières peuvent s'écouler sans qu'il s'en produise et, par conséquent, sans que la rivière accomplisse un travail géologique appréciable; tandis qu'une inondation de quelques heures, survenant avec violence, pourra modifier le lit majeur dans toute son étendue.

En tout cas, si les circonstances extérieures demeurent les mêmes, la marche que poursuit un cours d'eau le conduit sûrement vers une situation d'équilibre et, quand il l'a conquise, sa puissance, comme agent de remaniement et de transport, est réduite au point de se trouver parfois presque entièrement supprimée. Aujourd'hui les diverses rivières se montrent très inégalement avancées dans ce travail de conquête. Les unes, comme le Nil, ont acquis une stabilité presque absolue; d'autres, comme la Loire, remanient encore leur lit. Mais, pour toutes, les dimensions actuelles des vallées sont très supérieures à ce qu'exigent les plus fortes crues. Cela témoigne évidemment d'un état antérieur, où le régime des eaux devait être beaucoup plus violent, par suite d'une plus grande abondance des pluies et peut-être d'une plus forte valeur de la pente.

Profil des vallées. — Dans tous les pays où l'imperméabilité du sol fait prévaloir le ruissellement, le profil en travers des vallées est concave (fig. 6) et se rapproche d'autant plus d'un V que le régime est plus torrentiel. Cette forme concave tient à ce que les versants imperméables laissent se former à leur pied, par entraînement de débris lors des grandes pluies, des



Fig. 6. — Profil d'une vallée à versants imperméables.

talus de *dépôts meubles sur les pentes*, qui viennent se souder avec le limon déposé par le cours d'eau dans ses crues. Au contraire quand, par suite de la perméabilité du sol, cet apport latéral fait défaut, le fond du lit majeur est plat; parfois même (fig. 7) la rivière coule sur la partie la plus haute de ce fond,



Fig. 7. — Profils de vallées à versants perméables.

le lit mineur ne pouvant guère manquer de s'exhausser graduellement par les matières que la rivière charrie, si tranquille et si limpide qu'elle soit, et qu'elle dépose en bourrelets uniquement sur les bords du courant.

Dépôts d'embouchures. Barres. Deltas. — A quelque période de son évolution qu'un fleuve soit parvenu, ses eaux, à la fin de leur course, vont déboucher dans le grand réservoir de l'océan, où elles arrivent en général avec assez peu de vitesse pour ne pouvoir entraîner que du sable fin et de la vase. Si l'embouchure est un *estuaire* profond et que des courants sensibles balayent la côte, les détritits sont dispersés à leur arrivée dans la mer, sans que leur chute (assez rapide à cause de la différence de densité de l'eau douce et de l'eau salée) se traduise autrement que par une *barre*. C'est une digue mobile de vase

qui se forme, au-devant de l'embouchure, à quelque distance au-dessous de la surface et dont la crête s'élève ou s'abaisse suivant les circonstances, en même temps qu'elle se déplace en avant ou en arrière.

Il n'en est plus ainsi quand l'embouchure est large, peu profonde, et que la mer où se verse le fleuve est dépourvue de marées sensibles ainsi que de courants littoraux rapides. Dans ce cas, si le cours d'eau est suffisamment chargé de matières en suspension, celles-ci se déposent dans l'estuaire et en opèrent peu à peu le comblement, sous la protection du cordon littoral de vase et de sable, que la vague ne manque pas d'élever en travers de l'embouchure; après quoi le fleuve franchit ce cordon et pousse ses alluvions jusque dans la mer, formant, au-devant de son ancien débouché, des atterrissements qui augmentent de proche en proche le domaine continental. Ces atterrissements se produisent, surtout lors des crues, sur les rives mêmes de la branche principale du fleuve; mais celle-ci est instable et se déplace fréquemment; de telle sorte que le dépôt finit par couvrir une assez vaste surface triangulaire, qui tourne sa pointe vers le fleuve, tandis que sa base est courbe et convexe du côté de la mer. De là le nom de *Delta*. Chaque fleuve traverse son delta par plusieurs branches d'inégale importance, susceptibles de se déplacer, parfois de s'oblitérer à la longue, et d'où se détachent de nombreux canaux secondaires.

Exemples de deltas. — Les deltas les plus célèbres sont : celui du Nil, aujourd'hui presque entièrement fixé et ne faisant plus aucun progrès appréciable; le delta du Rhône, qui progresse de nos jours à raison de 37 mètres par an devant la branche principale et qui a conquis, depuis l'époque gallo-romaine, près de 300 kilomètres carrés; le delta du Pô, où, par suite d'un transport annuel de troubles évalué entre 40 et 100 millions de mètres cubes (mais dont une grande partie est dispersée dans l'Adriatique), le progrès des alluvions est de 70 mètres par an; le delta du Danube, correspondant à un apport de 60 millions de mètres cubes; enfin et surtout celui du Mississippi, où l'excès des troubles charriés sur ceux que l'érosion et la mer dispersent suffit pour former, chaque année, une somme d'atterrissements de 28 millions de mètres cubes.

La force de ce fleuve est telle qu'il pousse son delta bien avant dans le golfe du Mexique, sous la forme d'une patte d'oie (fig. 8), dont le progrès annuel est de 80 ou 100 mètres.

Le Hoang-ho ou fleuve Jaune, en Chine, le plus limoneux de tous les cours d'eau, a formé un delta qui s'étend au moins sur 250 000 kilomètres carrés. La Hollande tout entière n'est que la réunion des deltas de

l'Escaut, de la Meuse et du Rhin, conquis sur la mer du Nord à la faveur des cordons littoraux de vase et de sable.

Quant au delta du Gange, il se forme, malgré l'obstacle opposé par les marées du golfe de Bengale, grâce à la supériorité du courant du fleuve en période de crues, courant capable de refouler la mer, et aussi grâce à la grande masse des troubles charriés; mais ce delta est très instable et fréquemment remanié par les tempêtes. Le sol y manque d'assiette et plus d'un reptile nageur s'y engloutit en croyant aborder sur un terrain solide.

Caractères généraux des deltas. Fleuves sans embouchure. — Les atterrissements d'un delta se formant dans un milieu où les eaux salées ont accès, on y trouve, en fait de faune, un mélange de formes d'eau douce et d'autres spécialement caractéristiques des estuaires. En outre, comme il y a souvent lutte entre le courant du fleuve et la vague, la stratification des dépôts peut être tourmentée, parfois *entre-croisée*.

Il convient de répéter, au sujet des deltas, ce que nous avons déjà dit à propos du régime des rivières. Le phénomène ne saurait être permanent et la vitesse d'accroissement des atter-

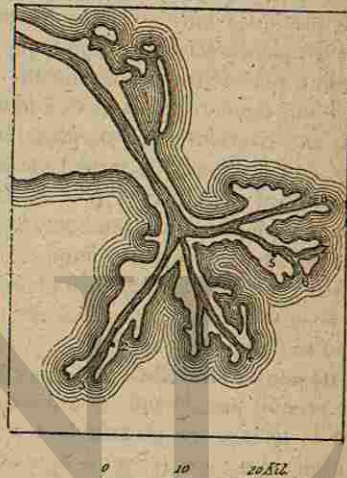


Fig. 8. — Delta du Mississippi. — 1, fourche des passes; 2, Pilotsville; 3, passe du sud-ouest; 4, passe du sud; 5, Balise; 6, passe du sud-est; 7, passe du nord-est; 8, passe à l'ouest.

rissements doit aller sans cesse en diminuant, à mesure que le fleuve se rapproche de la stabilité définitive. Si quelques deltas progressent, de nos jours, plus vite qu'aux siècles précédents, c'est parce que les défrichements opérés par l'homme ont, en dénudant le sol, augmenté momentanément la puissance du ruissellement et, par suite, la quantité des matières solides charriées à la mer. Mais toutes les fois que des sondages ont été pratiqués dans les deltas des grands fleuves, on a pu reconnaître par la série des dépôts que leur formation avait été, au début, plus active et plus violente qu'aujourd'hui.

D'une manière générale et à moins d'un changement de conditions extérieures, un moment doit venir pour chaque fleuve où, non seulement la formation du delta s'arrête, mais encore le courant peut n'avoir plus la force d'entraîner les troubles jusqu'au bout. Alors l'embouchure doit s'obstruer et se transformer en marécages, comme c'est le cas pour ces fleuves de l'Asie centrale, où l'activité humaine n'a pas suffisamment veillé à assurer le libre écoulement des eaux par une lutte incessante contre l'alluvionnement.

Bassins perméables. Nappes d'eau. — Le ruissellement ne se produit pas, lorsque la pente du sol est faible, dans les pays où le terrain est perméable. Il y a deux sortes de formations perméables : les terrains *meubles*, c'est-à-dire les sables et graviers, où toute la masse peut être imbibée d'eau, à cause des innombrables interstices que laissent entre eux les éléments ; et les terrains *fissurés*, tels que les calcaires solides et les grès, où l'eau pénètre par des fentes et va se rassembler dans un réseau de canaux souterrains.

Dans les terrains meubles, l'infiltration fait naître, par imbibition progressive, des *nappes d'eau* continues, dont le niveau s'approche d'autant plus de la surface du sol, que la pluie a été plus abondante et l'évaporation moins active. Ces nappes trouvent leur écoulement par des *sources* dans le fond des vallées qui les entament et sur les deux versants desquelles elles se relèvent progressivement, étant mieux protégées sous les lignes de faite contre l'action du soleil, grâce à l'épaisseur plus grande du terrain qui les recouvre.

Quand une couche meuble repose sur un lit d'argile, l'eau

qui s'y est infiltrée, arrêtée par l'imperméabilité de ce dernier, va chercher son écoulement sur les flancs des vallées, aux points où affleure la couche argileuse, en déterminant un *niveau d'eau*, toujours indiqué par la végétation, habituellement par des peupliers. Si l'affleurement subit des ondulations, de petites *sources* en marquent les points les plus bas.

Nappes jaillissantes. — Lorsque la couche absorbante plonge, dans les profondeurs du sol, *au-dessous* d'une couche imperméable, cette dernière retient les eaux sous pression et les oblige à descendre en formant une *nappe souterraine* sans écoulement. Il suffit que, par un sondage ou un puits, on perce la couverture argileuse, pour que les eaux, obéissant à la pression hydrostatique, s'élèvent dans le puits et quelquefois *jaillissent* à la surface du sol (fig. 9). Dans ce cas, le sondage est dit *artésien*.

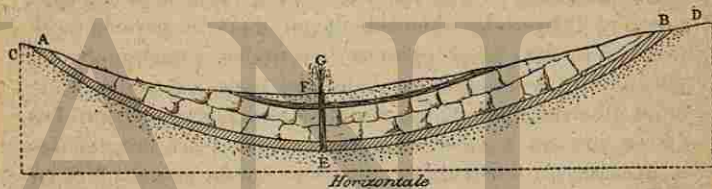


Fig. 9. — Nappe jaillissante. — AB, couche imperméable; CD, couche aquifère; EF, puits artésien.

Les puits artésiens de Paris (Grenelle, Passy, etc.) recueillent, entre 500 et 600 mètres de profondeur, les eaux tombées dans les Ardennes, la Champagne et la Bourgogne sur l'affleurement d'une couche de *sables verts*. Malgré la perte de charge que l'eau subit dans son long parcours souterrain, elle garde encore assez de force ascensionnelle pour s'élever à 40 mètres au-dessus de la plaine d'alluvions de la Seine.

Terrains fissurés. Grottes. — Lorsqu'un bassin hydrographique est formé surtout de terrains fissurés, les eaux d'infiltration circulent à travers les fentes, les élargissent peu à peu, y créent des cavités ou *grottes*, où elles s'accumulent et vont parfois, après un très long parcours, déboucher dans quelque vallée en donnant naissance à des *sources* abondantes (*dhuys*

de la Bourgogne), remarquables à la fois par leur limpidité et leur constance. Telles sont, par exemple, les sources de la haute vallée de la Seine.

Le débit de ces sources étant régularisé par le long parcours des eaux qui les alimentent et surtout par les réservoirs souterrains qu'elles ont traversés, les rivières issues de ces sources sont généralement exemptes de crues violentes et ne charrient qu'exceptionnellement du limon et des sables. Aussi leur régime est-il très stable et leur action mécanique à peu près négligeable. En revanche, la longue circulation des eaux souterraines à travers les canaux sinueux des grès et surtout des calcaires dérange souvent l'assiette du terrain et provoque des *effondrements* de la surface, lorsque les cavités, produites par l'élargissement progressif des fentes, sont devenues trop larges pour pouvoir continuer à se soutenir.

Éboulements. — C'est aussi à la lente infiltration des eaux que sont dus certains éboulements qui, dans les pays de montagnes, prennent les proportions de véritables catastrophes. Ces phénomènes se produisent quand des pluies excessives ou la fonte des neiges ont délayé certaines couches de terrain. Les assises que ces couches supportent, après s'être progressivement fissurées, finissent par glisser en masse et s'abattent en quelques minutes dans la vallée voisine.

Parmi les éboulements les plus fameux, on peut citer celui du Rossberg, survenu en Suisse en 1806 et dont l'importance a été évaluée à 15 millions de mètres cubes; celui de Salazie (île Bourbon), qui, en 1875, a couvert 120 hectares d'un manteau d'éboulis de 40 à 60 mètres de hauteur; enfin celui de 1881 à Elm, en Suisse, représentant 10 millions de mètres cubes.

En même temps que ces éboulements produisent des dépôts confus, qui rentrent avec les matériaux entraînés par les avalanches dans la catégorie des *dépôts meubles sur les pentes*, il leur arrive parfois de barrer les rivières et d'en changer le cours. Ce changement peut n'être que momentané, si la rivière parvient à emporter l'obstacle après avoir formé en arrière un lac provisoire. Dans ce cas, la débâcle qui résulte de la rupture du barrage exerce des effets destructeurs encore plus puissants que ceux des torrents ordinaires.

Mesure de l'activité des eaux courantes. — Les principaux fleuves du globe emportent à la mer une proportion de matières solides qui paraît atteindre, en moyenne, 38 cent-millièmes du volume de l'eau débitée. D'autre part, le volume total annuel de l'eau des fleuves peut être évalué à environ 23 000 kilomètres cubes. D'après cela, on calcule que les sédiments amenés dans l'océan par les eaux courantes représentent, chaque année, un peu plus de *dix kilomètres cubes* (c'est-à-dire dix milliards de mètres cubes). D'ailleurs les mêmes eaux courantes enlèvent annuellement aux continents, par simple dissolution, près de *cinq kilomètres cubes*. On peut déduire de ces données que, si l'activité des agents extérieurs demeurait toujours ce qu'elle est aujourd'hui, cinq millions d'années suffiraient pour amener la disparition totale de la terre ferme.

Cette disparition totale est d'autant plus admissible qu'en analysant le mode d'action des eaux courantes, on peut se convaincre que l'érosion continentale (si aucune cause interne ne vient modifier le relief existant) doit avoir pour terme final l'aplatissement complet de toute région, quelle qu'elle soit. Mais il est très certain que l'activité des puissances extérieures n'est pas constante et dès lors le chiffre qui vient d'être établi ne peut être considéré que comme fournissant un aperçu de la puissance des eaux courantes.

§ 4

ACTION DE LA MER

Érosion du rivage. — Nous venons de voir quelle masse considérable de matières solides était apportée, chaque année, dans l'océan. Une partie de cette masse se dépose dans les estuaires et les deltas; mais le reste en franchit les limites et vient se mélanger à tous les débris que les vagues de la mer ont arrachés aux rivages.

Au premier abord, à ne considérer que le bruit habituel des flots, on serait tenté de croire que l'érosion marine doit être supérieure en importance à l'activité beaucoup plus silencieuse des cours d'eau. Il n'en est rien, comme on peut aisément s'en

assurer. Mais auparavant définissons le mode d'action de la mer sur ses rivages.

Poussées par le jeu périodique de la marée et plus encore par les vents dominants, qui viennent du large, les vagues vont assaillir la côte, où déjà l'infiltration des eaux pluviales et les alternatives de la température ont préparé la désagrégation des roches. Ces dernières s'écroutent par morceaux, que le choc des lames continue à déliter, et ainsi la côte recule peu à peu, sous l'effort de l'érosion. Tandis que les matériaux plus durs demeurent sur le rivage, constamment ballottés dans un espace restreint, où ils se contentent d'arrondir leurs angles par frottement mutuel, en devenant des *galets*, disposés en terrasses, d'autres, également durs, mais moins cohérents, se réduisent en fragments plus menus qui, emportés par le flot de retour, viennent former, en avant des galets, une plage de *graviers* d'abord, de *sables fins* ensuite.

Quant aux matières assez fines pour demeurer en suspension dans les eaux agitées, comme les boues qui proviennent de la trituration des argiles, elles vont se déposer plus loin du rivage, aux endroits où la vitesse des lames est moindre et où, par une sorte de filtrage, ces boues peuvent arriver peu à peu dans les couches d'eau inférieures, soustraites aux agitations de la surface. Ainsi prennent naissance des dépôts de *boues* ou *vases*, plus ou moins mêlés de menus débris de nature sableuse. On sait aujourd'hui, par les sondages en eau profonde, que ces vases forment, en avant des côtes, une ceinture dont la largeur se tient entre 250 et 300 kilomètres, de boues tantôt vertes, tantôt bleuâtres.

Activité de l'érosion marine. — Mais ces vases ne renferment pas seulement les matières fines produites par l'attaque des vagues contre le rivage. Elles contiennent, en proportion dominante, les troubles apportés par les fleuves et non déposés dans les deltas. Nous disons en proportion *dominante*. En effet, l'observation prouve qu'il serait excessif d'admettre que l'érosion marine fit reculer l'ensemble de toutes les côtes, en moyenne, de plus de *trois mètres par siècle*. A ce taux, en supposant que les rivages aient une hauteur moyenne de 50 mètres, l'étendue totale des côtes étant voisine de 200 000 kilomètres, il en résul-

terait une perte annuelle de *trois dixièmes de kilomètre cube*, c'est-à-dire hors de proportion avec le chiffre qui représente l'ablation par les eaux courantes. Ce qui prouve bien, d'ailleurs, qu'il en doit être ainsi, c'est que la bande formée le long des côtes, par les dépôts détritiques ou *terrigenes*, comme on les appelle quelquefois, bande très étroite en général, subit un élargissement notable partout où débouche un grand fleuve. Cet effet est particulièrement marqué au-devant de l'embouchure du Gange, comme de celle du fleuve des Amazones.

Stratification des dépôts détritiques. — Tous les dépôts ainsi formés sont des *sédiments*, c'est-à-dire constitués par la chute de matières solides au sein de l'eau. De plus ils sont *détritiques*, c'est-à-dire qu'ils consistent en *débris* empruntés à des *roches* préexistantes. Comme la pesanteur est l'agent de leur chute, ils doivent se disposer conformément aux lois de la gravité; ce qui exige que les débris tombent à plat et s'accumulent de telle sorte, que la surface du sédiment soit toujours horizontale, sauf dans la zone des graviers, où la vitesse de l'eau permet la disposition en couches inclinées. De plus, l'activité de la destruction des côtes étant inégale, puisque la puissance de la vague dépend de l'heure de la marée et qu'en outre une seule tempête peut faire incomparablement plus de travail que toute une série de jours calmes; d'autre part, l'apport des troubles par les fleuves étant essentiellement variable suivant les saisons et le régime des eaux, le dépôt n'est pas continu. Les éléments n'y sont pas à tout instant de la même grosseur ni de la même nature. C'est pourquoi le sédiment doit tendre à se diviser, suivant les surfaces qui correspondent aux plus grandes variations du phénomène, en *couches* ou *strates* distinctes, ce qui légitime l'appellation de *dépôts stratifiés*, appliquée aux formations *sédimentaires*. Remarquons seulement que, s'il s'agit de boues extrêmement fines, déposées à la façon d'un précipité nuageux dans une liqueur tranquille, la stratification pourra demeurer indistincte, à moins qu'elle ne soit accusée de temps en temps par un brusque arrêt de la sédimentation.

Débris organiques. — Les animaux qui vivent dans la mer doivent nécessairement, après leur mort, laisser leurs dépouilles

sur le fond. Parmi les coquilles, les unes sont ramenées à la surface et flottent jusqu'à ce qu'elles aient été rejetées, entières ou en fragments, au milieu des graviers littoraux; les autres, celles dont les animaux vivaient enfouis dans la vase, ne laissant passer que l'extrémité de leur tube, demeurent dans le sédiment, avec la position qu'elles occupaient à l'état vivant. Quant aux vertébrés, après que leurs corps ont flotté quelque temps, les dents et les ossements se dispersent plus ou moins et, sous l'action combinée des courants et de la pesanteur, vont se disséminer, partie dans les graviers littoraux, partie dans les boues profondes. De toutes manières, les dépôts marins littoraux, qui ne correspondent pas à des eaux trop violemment agitées, renferment les débris des animaux contemporains de leur formation.

Variété des dépôts synchroniques. — Les sédiments doivent se ressentir, dans leur composition, de la nature des roches qui leur ont donné naissance. En outre, leur puissance, pour un intervalle de temps déterminé, dépend de l'activité de l'érosion, laquelle est essentiellement variable suivant les points. Une même époque verra donc le fond de la mer, au voisinage des côtes, se tapisser de dépôts très différents quant à la nature et à l'épaisseur, et aussi quant à la faune, cette dernière pouvant être *littorale* ou *pélagique* (c'est-à-dire de haute mer). Dans le premier cas, la faune pourra correspondre à des profondeurs d'eau très différentes, ce qu'on devra reconnaître à l'espèce des coquilles enfouies. Dans le second, les espèces varieront aussi, selon qu'il s'agira de fonds rocheux ou de fonds vaseux, de mers chaudes ou de mers froides, etc. En un mot, la diversité des dépôts traduira la variété des conditions physiques.

Parages dépourvus de dépôts. — Nous avons dit que les vases détritiques s'étendaient rarement à plus de 300 kilomètres en avant des côtes. Par suite, dans les océans qui offrent des espaces libres d'une grande largeur, ces espaces ne peuvent recevoir sur le fond aucun dépôt mécanique, à moins que des courants ayant pris naissance près des rivages n'y entraînent, soit directement, soit à l'aide des glaces flottantes, quelques fragments de roches, ou que de menues esquilles de pierre

ponce n'y parviennent après avoir flotté à l'aventure, comme c'est le cas dans le Pacifique. Dans ces régions, il ne peut se former que des dépôts chimiques ou organiques; mais ce sujet appartient à un autre chapitre de la dynamique externe et il en sera question plus loin.

On estime aujourd'hui que les dépôts détritiques en voie de formation, tels qu'ils sont accusés par les sondages, couvrent environ *un cinquième* de la superficie totale du fond des océans.

Il y a, dans le voisinage des côtes, des parages où les dépôts mécaniques font défaut, parce que les courants sont assez puissants pour balayer le fond de la mer. Seulement cela n'arrive en général que dans des détroits de faible profondeur, la vitesse des courants diminuant assez vite au-dessous de la surface.

Intensité variable de l'érosion marine. — Telles sont les conditions normales de l'action dynamique de la mer. Mais une question se pose, celle de savoir si cette action peut s'exercer indéfiniment avec la même intensité moyenne. Les faits ne permettent pas de le croire. A moins qu'il n'intervienne un changement dans les relations de niveau de la terre ferme et de l'océan, une côte, à force de se dégrader, doit finir par acquérir un profil qui la rende de moins en moins accessible à l'attaque des vagues. Déjà nous avons indiqué le rôle protecteur que jouent les cordons littoraux de dunes. Les galets et les limons sont souvent tout aussi efficaces. Ils régularisent le contour des côtes, par suite de leur tendance à former des cordons rectilignes, laissant en arrière des anses ou des *lagunes* destinées à se combler peu à peu. La végétation, lorsqu'elle parvient à s'installer dans l'intervalle de deux grandes marées, produit, sur les vases littorales de récente formation, un excellent effet de consolidation. Même les côtes découpées en falaises finiraient par n'être plus entamées, si la gelée et les infiltrations ne venaient en aide aux vagues, en préparant la division des roches. Ainsi l'intensité de l'érosion marine, à supposer qu'elle ne reçoive pas de secours du dehors, doit aller en décroissant en chaque point, et ses progrès mêmes imposent une limite à son efficacité. Sa valeur se montre d'ailleurs très variable, comme on en peut juger quand on compare la stabilité presque

absolue des côtes de la Bretagne avec l'érosion des falaises de la Hève, progressant à raison de 25 ou 30 centimètres par an, et mieux encore avec l'attaque de certains points des côtes de l'Angleterre et de la mer du Nord, où l'ablation annuelle n'est pas inférieure à un mètre.

Cette diversité trouve sa raison d'être, non seulement dans l'inégalité de puissance des vagues ou de résistance des roches, mais encore dans ce fait que probablement le travail de la mer n'a pas commencé sur toutes les côtes à la même époque, de telle sorte qu'il peut être, suivant les localités, très inégalement avancé.

§ 3

ACTION DE LA GLACE

Chutes de neige. Neiges persistantes. — Il convient maintenant d'étudier ce que devient la partie de la vapeur atmosphérique qui s'est condensée sous la forme neigeuse.

Quand la neige tombe sur des régions de faible altitude, elle est tôt ou tard fondue par les rayons solaires et, suivant la nature du sous-sol, le produit de cette fusion vient accroître la part du ruissellement ou celle de l'infiltration. L'action dynamique de ce produit se confond avec celle des eaux courantes et il y a eu simplement, dans sa manifestation, un temps d'arrêt causé par le peu de mobilité des particules neigeuses. En outre, il est à remarquer que la neige, par la lenteur avec laquelle elle fond, facilite l'infiltration sur les pentes, en faisant pénétrer goutte à goutte, dans le sol, de l'eau qui aurait pu ruisseler à la surface, si sa chute avait eu lieu sous la forme liquide. Elle contribue donc encore de ce chef à la régularisation du régime des cours d'eau et à la diminution de leur puissance mécanique.

Bien plus important est le rôle de la neige qui tombe sur les hautes montagnes, dans ces régions où la raréfaction de l'atmosphère est telle, que la chaleur de la saison chaude ne parvient pas à fondre la totalité des neiges tombées pendant la saison froide.

Dans ces conditions, les neiges deviennent *persistantes* ou *perpétuelles* et peuvent s'amonceler en quantités considérables.

Cette permanence des neiges se manifeste à partir d'une certaine ligne dont l'altitude, variable avec les contrées et l'abondance des neiges, est de 2800 mètres en Suisse, de 3300 à 4300 mètres au Caucase, tandis qu'elle s'abaisse au niveau de la mer, dans l'hémisphère méridional, dès le 62° degré de latitude. Plus le climat est exempt de variations, plus la limite des neiges persistantes est nette et stable. Sous les tropiques, elle forme, entre 4700 et 5000 mètres d'altitude, une ligne horizontale d'une netteté absolue. Au contraire, sa position varie beaucoup dans l'hémisphère nord, à cause de la grande différence entre l'hiver et l'été.

Avalanches, névé. — Quelle que soit l'abondance des chutes de neige, l'accumulation d'une matière aussi meuble a nécessairement une limite. Quand cette limite est dépassée, des paquets de neige tombent sur les pentes, formant les *avalanches*, si redoutées des montagnards, non seulement à cause de leur masse, mais à cause de la quantité de pierres et de blocs qu'elles peuvent entraîner dans leur chute.

Ou bien les avalanches glissent sur une pente qui ne permet pas leur concentration et, dans ce cas, la neige, après avoir accompli son œuvre et déposé sa charge de matériaux solides, alimente en fondant les torrents voisins; ou bien l'excès des neiges persistantes est dirigé, par la convergence des cimes, vers un réservoir en forme de grand cirque, où il s'emmagasine et devient, après avoir subi diverses transformations, la source d'un *glacier*. Ce réservoir est donc, pour le glacier qu'il alimente, un *bassin de réception* des neiges, équivalent du bassin de réception des torrents.

Au moment où la neige tombe sur les hautes montagnes, elle est à l'état de petits cristaux en forme d'étoiles. Bientôt ces cristaux subissent, sous l'action des rayons solaires, un commencement de fusion et deviennent des granules plus ou moins arrondis, dont l'ensemble forme une sorte de poussière blanche très mobile. En s'accumulant dans les grands cirques, cette poussière de neige commence à s'agglomérer, l'eau qui provient de la fonte superficielle des grains se congelant dans leurs

interstices. De là résulte un amas peu cohérent de granules, parsemé de bulles d'air, qu'on appelle le *névé*.

Formation des glaciers. — Les couches inférieures du névé sont de plus en plus compactes à cause de la pression qu'elles supportent. D'ailleurs le cirque dans lequel les neiges se sont emmagasinées débouche toujours dans une gorge plus ou moins encaissée, où le névé, sollicité à la fois par son poids et par la pression d'amont, est forcé de descendre. De cette manière, le névé finit par arriver dans une zone de moindre altitude, où la température est au-dessus de zéro. La fusion partielle qui en résulte augmente la compacité de la masse, et ainsi, de la poussière neigeuse des cimes, on passe à cette glace cohérente, translucide, parsemée de fissures capillaires et parfois de veines bleuâtres, qui caractérise les *glaciers* proprement dits.

Un glacier peut donc être qualifié : un appareil naturel qui a pour fonction de débiter l'excès des neiges persistantes, tombées sur toute l'étendue d'un cirque montagneux.

En tout cas, de même qu'un fleuve est alimenté par les sources ou le ruissellement, de même un glacier a besoin, avant toute chose, d'abondantes chutes de neige, et comme celles-ci résultent de la condensation de la vapeur atmosphérique, des vents humides sont par-dessus tout nécessaires à la production des glaciers. Le froid tout seul n'en saurait faire naître, et c'est pour cette cause que les glaciers sont si rares dans le Tibet, où l'air arrive sec, s'étant dépouillé de son humidité sur le flanc de l'Himalaya.

Crevasses. Regel. — La glace étant inextensible et à peu près dépourvue de plasticité, elle se fissure sans cesse lorsque, dans son mouvement de descente, elle subit des compressions ou des dilatations. Mais les crevasses ainsi produites sont bientôt comblées par des chutes de neige ou de menus fragments de glace, autour desquels les eaux d'infiltration, provenant de la fonte superficielle, viennent se geler de nouveau, en faisant du tout, sous l'effort de la compression d'amont, une masse solide. La continuité de la glace, constamment interrompue par la formation des crevasses, est donc aussi constamment rétablie par le *regel*. L'ensemble de la masse étant d'ail-

leurs maintenu dans un milieu où règne une température supérieure à zéro, il en résulte pour la glace une tendance à se rapprocher de la forme liquide et la pression des parties supérieures s'y fait sentir en même temps que l'action de la pesanteur. Les fissures capillaires divisent d'ailleurs sa masse en grains qui peuvent se mouvoir les uns relativement aux autres. De cette manière, il est permis de dire qu'un glacier est un fleuve ou plutôt un torrent d'eau glacée, dont l'analogie avec les eaux courantes se prononce d'autant plus nettement que la température ambiante est plus élevée.

Mouvement des glaciers. — Des mesures précises ont en effet permis de constater que les glaciers cheminent avec une vitesse variable, plus grande en été qu'en hiver, plus sensible à la surface qu'au fond, et atteignant son maximum au milieu de la largeur, tandis que, sur les bords, elle est réduite par le frottement des parois. Avant ces mesures, on savait déjà qu'un glacier restituait en aval les objets tombés à sa surface en amont. Par exemple, l'échelle abandonnée en 1788 par les guides de Saussure, au pied de l'Aiguille Noire, avait été retrouvée en débris, cinquante-sept ans plus tard, à 4 kilomètres et demi plus bas. En Suisse, la vitesse moyenne de la glace, à la surface, varie depuis 2 à 3 centimètres jusqu'à 1 m. 25 par vingt-quatre heures. La vitesse des grands fleuves étant habituellement comprise entre 0 m. 50 et 1 m. 50 par seconde, on en peut conclure immédiatement qu'un glacier est un appareil naturel, par lequel le mouvement du produit des précipitations atmosphériques se trouve retardé, au moins dans la proportion de un à cent cinquante mille.

Effets de transport. Moraines. — Mais si la vitesse d'écoulement est ainsi considérablement ralentie, la puissance de transport est, au contraire, accrue. En effet la glace, en descendant, entraîne nécessairement tout ce qui tombe à sa surface. Un glacier est toujours encaissé entre deux parois abruptes, le long desquelles s'écroulent les blocs détachés des sommets par la gelée ou par les avalanches. Les produits de ces chutes forment, sur les deux bords du courant de glace, deux traînées latérales, connues sous le nom de *moraines*. On constate aisément que ces moraines se déplacent peu à peu, obéissant

au mouvement de la glace qui les porte. Même, lorsque deux glaciers se réunissent en un seul, la moraine de droite de l'un se joint à la moraine de gauche de l'autre, et par là se forme une moraine médiane, qui peut garder longtemps son individualité, apparaissant comme une trainée noire vers le milieu de la largeur du glacier résultant. Et si cet effet se répète plusieurs fois, on distingue, à la surface de ce glacier, autant de trainées, d'inégale largeur, qu'il y a eu d'affluents puissants (fig. 10).

Pendant le transport, les blocs des moraines, fortement pressés contre les parois de la gorge, les usent, les polissent et souvent y tracent des stries ou rayures. Il en est de même sur le fond, lequel est en outre balayé par des courants sous-glaciaires, produits de la fonte partielle de la glace, qui charrient de la boue fine et de petites pierres. Tout cela finit par arriver en un point où l'ablation, c'est-à-dire l'intensité de la fonte de la glace, sous l'influence d'une température extérieure qui croît à mesure qu'on descend, devient justement égale à l'alimentation. Alors le glacier s'arrête, laissant s'échapper de son extrémité un torrent, dont l'eau est laiteuse à cause des fines particules qu'elle charrie.

Quand un glacier est puissamment alimenté, comme c'est le cas en Suisse pour la Mer de Glace du Mont-Blanc, son extrémité parvient sans peine jusqu'à la zone des cultures, et c'est un contraste remarquable que celui de cette nappe glacée avec les campagnes verdoyantes et les forêts qui arrivent presque à son contact. De même, en Nouvelle-Zélande, des chutes de neige d'une ampleur considérable parviennent à pousser le front de quelques glaciers jusqu'à une faible distance de la mer, au milieu de régions où se développe tout à l'entour une végétation luxuriante.

À l'extrémité libre d'un glacier, les moraines et les matériaux transportés sur le fond s'épanouissent en un amas demi-circulaire, qualifié de *moraine frontale*. C'est un mélange sans stratification de gros blocs, pour la plupart anguleux, de cailloux, de petites pierres et de boue d'un gris d'ardoise. Beaucoup des cailloux de cette moraine sont *polis*, *frottés* ou *rayés*. Cela est surtout fréquent avec les pierres calcaires, qui reçoivent beau-

coup mieux les stries, mais aussi les perdent très vite par frottement dans l'eau ou par exposition à l'air.

Quelques-uns des blocs des moraines sont de dimensions énormes et dépassent tout ce que les torrents les plus violents seraient capables de déplacer. De cette manière, un glacier se révèle à nos yeux comme un instrument de transport d'une grande efficacité, qui aide à faire arriver, dans une situation de

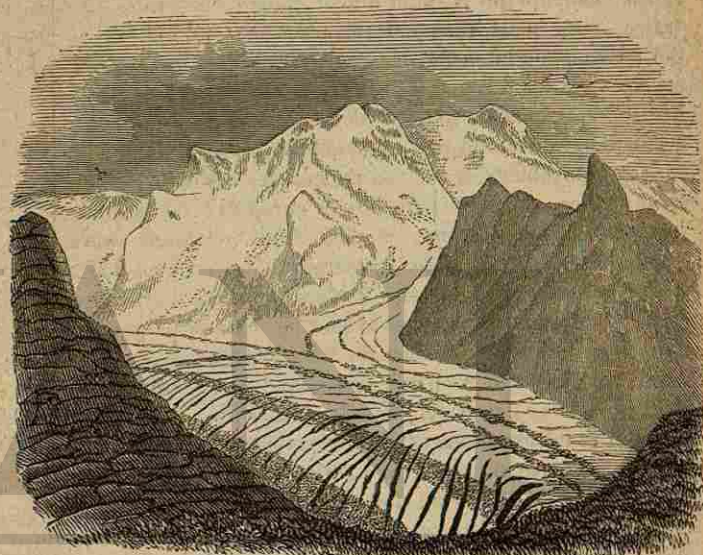


Fig. 10. — Moraines, crevasses et parois polies du glacier de Gorner.

meilleur équilibre, soit des blocs arrachés à ces hautes cimes que l'eau courante ne saurait atteindre, soit des matériaux défiant, par leurs dimensions, la puissance des cours d'eau. En même temps les glaciers régularisent, en les emmagasinant comme dans un réservoir, les produits des chutes de neige et assurent l'alimentation des fleuves en été, soit juste au moment où ils en ont le plus besoin. D'ailleurs la neige, par sa condensation, a restitué aux régions supérieures la chaleur latente que l'évaporation avait prise dans des pays plus chauds, tandis que, pour fondre, une fois transformée en glace, elle devra

emprunter à des régions inférieures le calorique nécessaire. Les glaciers contribuent donc à *égaler* les climats du globe.

Déplacements de l'extrémité des glaciers. — La position de l'extrémité libre d'un glacier résulte d'une sorte de lutte entre la quantité de glace qui arrive par l'amont, et la fusion superficielle due à l'action directe du soleil et à celle de l'air ambiant. Cette extrémité ne pourrait demeurer fixe que si les éléments qui la déterminent étaient constants. Au contraire, rien n'est plus variable, suivant les années ou les périodes, que l'intensité des chutes de neige et l'activité des rayons solaires. Aussi voit-on se produire un déplacement continu du front du glacier. Celui-ci tantôt recule, mettant à découvert son fond poli et *moutonné*, tantôt s'avance, labourant impitoyablement sur son passage les cultures, les plantations et les maisons. L'histoire a enregistré de nombreuses oscillations de ce genre, et plus d'une ancienne moraine, aujourd'hui cultivée, mais reconnaissable à ses gros blocs, se montre en des points que les glaciers ont cessé d'atteindre.

Si l'ablation et l'alimentation sont les deux principes antagonistes qui règlent la position du front des glaciers, leur action ne se fait pas sentir avec une égale rapidité. L'ablation s'exerce par les rayons solaires sur toute la surface libre du glacier, par le soleil et le rayonnement de l'air ambiant sur la partie inférieure du fleuve de glace. Son action est donc immédiate, et l'influence d'un été chaud doit se traduire sans délai par une diminution de longueur et d'épaisseur. Quant à l'alimentation, c'est surtout par l'augmentation de la masse des névés qu'elle est efficace. Sans doute, une partie de la neige tombe directement sur le glacier et en accroît la masse; mais cet effet est peu de chose à côté de celui que doit produire l'excès des névés accumulés, pendant tout un hiver neigeux, sur la surface entière du cirque où s'alimente le glacier. Or, avant de se révéler dans les régions inférieures, cet excès de névés doit se transformer et opérer une descente progressive qui, d'après le taux moyen de la vitesse des glaciers, demande au moins quelques années.

En Suisse, l'observation montre qu'une série d'hivers neigeux met quelquefois vingt-cinq ans à manifester son action. Et comme celle-ci, une fois commencée, continue à se produire, il

arrive souvent que les mouvements de l'extrémité libre soient contradictoires avec l'ensemble des circonstances ambiantes, un glacier continuant à progresser pendant une suite d'années chaudes et sèches.

Influence de la jonction des glaciers. — Il est à remarquer aussi que les déplacements de l'extrémité des glaciers peuvent devenir, en quelque sorte, disproportionnés en apparence avec la cause qui les produit. En effet, si deux d'entre eux, jusqu'alors séparés, viennent à se réunir, ils formeront en général, une fois soudés dans une gorge commune, un courant dont la largeur ne sera pas égale à la somme des largeurs des affluents. Il faudra donc que l'épaisseur du glacier résultant soit plus considérable. Mais comme la fusion de la glace s'opère surtout par la surface et que cette dernière n'a pas augmenté en proportion de la masse, le glacier, mieux défendu contre l'ablation, s'avancera plus loin que ne l'aurait fait isolément chacun des deux affluents, cheminant sans se réunir. Ainsi, dans le cas où une exagération des chutes de neige provoquerait la rencontre de plusieurs glaciers habituellement isolés, l'extrémité libre pourrait progresser beaucoup plus loin que ne le ferait supposer l'allure des affluents avant leur réunion.

Profil des gorges occupées par les glaciers. — Un glacier est un remarquable instrument de *déblaiement*. La glace, par le frottement des pierres transportées, fait disparaître sous un poli uniforme toutes les inégalités de la gorge qu'elle remplit, et sa pression suffit pour écarter de son lit tous les obstacles. Aussi quand, à la suite d'une longue série d'années sèches, le niveau de la glace s'abaisse en même temps que le front recule, on voit à découvert l'ancien lit sous la forme d'une gorge au fond assez plat, aux parois escarpées, ayant une section qui rappelle la lettre U, tandis que la section des vallées torrentielles, où les versants sont plus sujets à s'ébouler, a plutôt la forme d'un V.

Mais si la glace excelle à déployer son chemin en écartant tous les matériaux meubles, du moins on ne l'a pas encore vue se creuser un lit dans les roches dures.

Toutes les gorges aujourd'hui occupées par des glaciers laissent apercevoir des parois polies et arrondies jusqu'à une hauteur bien supérieure à celle que la glace a jamais atteinte

depuis les temps historiques. Ce fait, joint à l'existence d'anciennes moraines, semées en divers points, permet d'affirmer que le travail et les dimensions des glaciers actuels ne sont plus qu'un écho affaibli de ce qu'ils ont été autrefois. Là encore, comme pour les torrents et les rivières, nous sommes ramenés par le seul examen des faits à la notion d'une période antérieure de plus grande activité.

Glaces polaires. — Le phénomène des glaces qui, dans les régions tempérées, est localisé au cœur des massifs montagneux, prend dans les hautes latitudes une extension considérable. La limite des neiges persistantes s'y abaisse progressivement jusqu'à atteindre le niveau de la mer et le sol disparaît, comme au Groenland, sous un manteau uniforme de neige et de glace, qui laisse à peine émerger quelques cimes.

La *calotte glaciaire* des régions arctiques ne transporte que très peu de pierres, ce qui n'a rien de surprenant, puisqu'elle est rarement dominée par des escarpements. Elle chemine cependant, avec une vitesse qui paraît même supérieure à celle des glaciers suisses, striant et polissant les roches sur son passage, et de véritables fleuves circulent sous sa masse. Le trop-plein de la calotte du Groenland s'écoule à la mer par de vrais glaciers, dont le front a quelquefois une immense largeur, mais dont beaucoup débouchent simplement au fond de profondes échancrures de la côte, appelées *fjords*. Après avoir flotté quelque temps, l'extrémité des glaciers polaires se brise en morceaux, qui deviennent des *glaces flottantes* ou *ice bergs*. Ces glaces flottantes de glaciers ne doivent pas être confondues avec les *banquises* qui se forment, le long des côtes, par congélation directe de l'eau de mer; ces dernières ont rarement plus de 5 ou 6 mètres d'épaisseur dans les mers arctiques, le froid de l'atmosphère ne se faisant plus sentir sous une couche de glace de cette puissance. En revanche, elles sont chargées de pierres et de boue, provenant des éboulements de la côte, et, quand elles se détachent en été pour flotter au gré des courants, les pierres se disséminent sur le fond de la mer.

Dans les parages antarctiques, où il n'y a pas d'étés capables de fondre la surface de la banquise, la congélation continue, sous la couche déjà formée, parce que l'eau de mer, devenue plus

dense, en se refroidissant librement à l'air, tend à descendre. De cette façon la banquise, formée de *glace salée*, en couches régulières successives, s'accroît par le bas et finit par acquérir une énorme épaisseur. En beaucoup de points elle dépasse le niveau de sa ligne de flottaison de près de 40 mètres, ce qui exige entre 200 et 300 mètres d'épaisseur totale.

Si les glaces polaires n'ont pas de moraines à leur surface, du moins elles entraînent une *moraine profonde*, formée par les matériaux arrachés au terrain sous-jacent; c'est une boue grise, parsemée de cailloux, les uns arrondis, les autres anguleux, la plupart frottés et rayés.

Quelque intense que soit aujourd'hui le froid des contrées voisines du pôle, il ne paraît pas suffisant pour expliquer toutes les accumulations de glace qu'on y observe. Aussi plusieurs d'entre elles sont-elles considérées comme des restes d'une époque antérieure, où les causes de froid étaient encore plus actives.

Glaces des rivières. — Un phénomène, qui a quelque analogie avec celui des banquises flottantes, se produit en hiver dans certaines rivières rapides et peu profondes. Des plaques de glace se forment sur le fond, pendant les nuits claires, à cause du rayonnement des cailloux qu'elles enferment à leur base. Ensuite elles viennent flotter à la surface et sont emportées par le courant, servant ainsi d'instruments pour déplacer des matériaux sur lesquels la rivière n'aurait pas de prise.

Le même effet de transport se répète sur les grands cours d'eau, dans certains hivers exceptionnels, lors de la rupture des *embâcles* que l'accumulation des glaces a fait naître en travers des étranglements du fleuve.

§ 6

ACTIONS CHIMIQUES

Caractère général des actions chimiques. — Dans tout ce qui précède, on s'est borné à considérer les effets *mécaniques* des agents extérieurs. Mais ce n'est pas à cela que se borne leur intervention. Les eaux courantes ne sont jamais pures et renferment des principes qui leur permettent de dissoudre une

partie des éléments des terrains qu'elles arrosent. Les eaux d'infiltration, contenant pour la plupart de l'acide carbonique emprunté à l'air, dissolvent dans leur parcours souterrain des éléments minéraux, qu'elles vont déposer plus tard aux points d'émergence des sources, ou qu'elles conduisent en dernière analyse dans le grand réservoir de la mer, au fond duquel ces substances peuvent se déposer, soit par réaction mutuelle, soit par évaporation. Enfin les eaux marines, riches en sels dissous, sulfate de chaux, chlorure de sodium (sel marin), chlorures et bromures de potassium et de magnésium, qu'elles peuvent abandonner en s'évaporant, sont aussi capables d'attaquer en partie les roches qui subissent une trituration dans leur sein, et de se charger ainsi de carbonate de chaux ou de silicates alcalins. De là résultent des *dépôts chimiques*.

Action des eaux météoriques. — L'eau de pluie ou *eau météorique* étant toujours chargée d'oxygène, son rôle principal consiste à oxyder les roches qu'elle traverse. Cet effet est surtout sensible sur les terrains qui contiennent du fer, et qui prennent, par la suroxydation de cet élément, une teinte rouge ou brune caractéristique.

Les calcaires sont attaqués par l'eau de pluie, à la faveur de l'acide carbonique qu'elle contient. Sous cette influence, les fentes naturelles du terrain s'élargissent par corrosion des parois. En débouchant à l'air, les eaux qui tiennent du calcaire en dissolution l'abandonnent par évaporation et ainsi se forment, surtout par incrustation progressive autour des mousses qui garnissent l'orifice des suintements, des *tufs*, tantôt terreux, tantôt compacts, avec coquilles d'animaux terrestres.

Quand l'évaporation des eaux calcaires est très lente, ce qui a lieu sur les parois des grottes et autres cavités, il se fait un dépôt concrétionné de carbonate de chaux, qui, en s'accroissant par couches concentriques, donne naissance aux incrustations connues sous les noms de *stalactites* et de *stalagmites*. Descendant de la voûte en pendentifs et en colonnes, ces incrustations, chaque jour accrues par de nouveaux suintements, forment sur le sol des grottes des *planchers stalagmitiques*, où sont empâtés les ossements et les déjections des animaux qui fréquentent les cavernes.

L'activité de l'accroissement de ces revêtements est en rapport avec la puissance des infiltrations, c'est-à-dire avec l'abondance des pluies, et peut être entièrement entravée, soit par la gelée, soit par l'établissement d'un régime sec. Dans toutes les grottes renommées pour leurs ornements stalagmitiques (et dont quelques-unes sont encore parcourues par des cours d'eau souterrains), non seulement la majeure partie des incrustations est de très ancienne date, mais encore sa formation remonte certainement à une époque où l'humidité était beaucoup plus abondante qu'aujourd'hui.

Les roches granitiques elles-mêmes, malgré leur dureté et le peu de solubilité de leurs minéraux, n'échappent pas à l'action prolongée des eaux météoriques. Peu à peu les silicates alcalins qu'elles renfermaient sont entraînés, laissant un résidu argileux, analogue au *Kaolin* ou terre à porcelaine. En même temps la roche perd sa cohésion et se transforme à la surface en un sable grossier meuble, qualifié d'*arène*. C'est surtout dans les régions tropicales, exposées à des pluies abondantes et chaudes, que cette altération des roches cristallines se produit sur une grande échelle.

Beaucoup de granites contenant des parties plus dures et plus résistantes que le reste de la masse, le progrès de l'altération à l'air isole ces parties sous la forme de gros blocs généralement arrondis. Il en résulte parfois des apparences bizarres, notamment des superpositions de blocs en équilibre instable, où l'imagination populaire aime à reconnaître l'intervention des géants; tandis que la situation des blocs résulte simplement de ce que les eaux courantes ont enlevé à peu près l'arène meuble au milieu de laquelle les parties dures étaient disséminées. Ces apparences sont donc un effet combiné de l'action chimique et du ruissellement.

Action de l'eau de mer. — Les eaux courantes enlèvent chaque année à la terre ferme, par simple dissolution, et amènent dans la mer, une proportion de matières minérales qui paraît n'être pas beaucoup inférieure à *cinq kilomètres cubes*. De ces substances dissoutes, les carbonates de chaux et de magnésie forment à eux seuls la moitié, et un dixième revient à la silice. Un autre dixième appartient aux sulfates de chaux,

de soude et de potasse. La mer subirait donc un enrichissement continu en ces matières, si quelques causes ne devaient contrebalancer l'effet d'un tel apport. La première de ces causes est l'évaporation dans les lagunes des pays chauds.

L'évaporation naturelle de l'eau de mer a pour conséquence le dépôt du *sulfate de chaux* ou *gypse*, quelquefois précédé par une précipitation de *carbonate de chaux*, substance encore moins soluble. Si la concentration s'accroît encore, le *sel marin* se dépose à son tour en petits cristaux blancs (réaction que l'homme régularise par la création des *marais salants*); après quoi peut venir le tour des chlorures et sulfates de potassium et de magnésium.

Dans les mers très chaudes, l'évaporation sur les rivages suffit pour déposer, sur les grains de sable de la plage, une incrustation de carbonate de chaux, qui en fait de véritables pierres. Le même carbonate peut aussi agglomérer les galets des plages en *poudingues*. D'autres fois, comme au bord des dunes, c'est une eau ferrugineuse qui, s'infiltrant dans les sables et arrêtée à une profondeur déterminée, en fait un *grès* d'un brun noirâtre, connu sous le nom d'*alios*.

Dans les mers profondes, où aucun sédiment détritique ne parvient, les dragages ont montré qu'il se formait une argile rougeâtre, par décomposition des éléments volcaniques du fond. S'il y a sur ce fond des corps étrangers, tels que des dents de requins ou des os de baleines, il se dépose à leur surface un enduit brun d'oxydes de fer et de manganèse. Cet enduit s'accroît avec une extrême lenteur, par couches concentriques successives et finit, à la longue, par donner naissance à des concrétions arrondies ou *nodules manganésifères*, abondants sur le lit du Pacifique par des profondeurs voisines de 5000 mètres.

Mais toutes ces réactions laissent encore subsister, dans les eaux de la mer, un notable excès de substances dissoutes, provenant de l'apport des fleuves. Cet excédent demande à être fixé par un procédé différent des actions mécaniques et physiques. C'est à quoi répond l'activité des organismes marins, dont il sera question un peu plus loin.

Résumé. — En résumé, comme toutes les autres manifesta-

tions de la dynamique externe que nous avons déjà examinées, l'action chimique est double et comporte un phénomène de *destruction*, suivi d'un phénomène de *reconstitution*. Le premier s'exerce aux dépens de la terre ferme, s'attaquant à des portions que ni l'air, ni la mer, ni les eaux courantes ne pourraient atteindre, pour leur enlever quelques-uns de leurs éléments constituants. Ces derniers accomplissent alors un certain parcours de haut en bas, jusqu'au jour où une nouvelle action, physique ou chimique, les fixe, pour quelque temps au moins, dans une meilleure situation d'équilibre, en les incorporant de nouveau, mais à une moindre distance du centre commun d'attraction, à la partie solide de l'écorce.

§ 7

ACTION DES ÊTRES VIVANTS

Caractères généraux de l'action des êtres vivants. — En analysant la manière d'être des agents extérieurs, nous les avons constamment vus tendre, comme d'eux-mêmes, vers un état d'équilibre relatif dans lequel, si les circonstances extérieures demeuraient les mêmes, leur puissance mécanique serait, sinon annihilée, du moins considérablement réduite.

Dans les régions où cet équilibre est établi, le jeu de la dynamique externe n'est pas pour cela suspendu. Mais il revêt une forme nouvelle, caractérisée par l'intervention des *êtres vivants*. Non seulement les organismes, animaux ou végétaux, prennent possession des sols ou des rivages devenus assez stables pour que leur édifice délicat puisse y subsister; mais il est un bon nombre d'entre eux qui s'appliquent à accroître l'écorce solide du globe, en la faisant profiter, soit des substances que l'action chimique avait entraînées dans les eaux douces ou salées, au risque d'en altérer la composition, soit même d'une partie des éléments de l'atmosphère, désormais fixés dans le sol sous une forme durable. Ainsi se constituent, par la simple accumulation des dépouilles d'une partie du monde vivant, de véritables *terrains*, dont le mode de formation est d'autant plus instructif, que nous y trouvons la clef des phénomènes qui ont présidé au

dépôt des calcaires et des combustibles minéraux; les calcaires, avec lesquels l'homme construit la plupart de ses édifices; les combustibles minéraux, qui seuls ont rendu possible le développement de l'industrie moderne. Comme s'il était entré dans les vues de la Providence d'employer, pour la préparation de ces matériaux, si caractéristiques de l'état de civilisation, quelque chose de plus relevé que la simple intervention des forces physiques et mécaniques!

Mode de formation de la tourbe. — Ce qu'on peut appeler l'action géologique des organismes terrestres se traduit de diverses manières; mais nous n'envisagerons ici que le travail des végétaux, parce qu'il est le seul qui s'exerce sur une échelle considérable, en donnant naissance au combustible minéral connu sous le nom de *tourbe*.

La tourbe est le produit de la décomposition sous l'eau de certains végétaux, parmi lesquels dominent, avec les cypéracées du genre *Carex* ou laiches, les mousses et spécialement les *sphaignes*. Les mousses tourbeuses exigent pour se développer une eau limpide et une atmosphère humide, avec une température moyenne qui ne dépasse pas 8 degrés centigrades. Quand ces conditions sont remplies, les sphaignes poussent avec une grande vigueur, en absorbant une quantité d'eau considérable, et meurent du pied pendant que leur tête continue à croître. Mais la décomposition de la partie inférieure s'accomplissant à l'abri de l'air, une partie seulement de la matière végétale se consume. Le reste forme un produit combustible de couleur brune, contenant de 58 à 60 pour 100 de carbone et où la structure organique devient de moins en moins reconnaissable, à mesure que la transformation est plus avancée. En même temps la compacité augmente progressivement.

La rapidité d'accroissement de la tourbe est très variable. Dans le Jura, elle oscille entre 0 m. 60 et 3 mètres par siècle. Mais cet accroissement n'est pas indéfini, et quand le bassin tourbeux jurassien, qui a débuté par des laiches, pour continuer par des mousses bryacées et des sphaignes, est suffisamment exhaussé, les bruyères s'y installent et la tourbe cesse de se former.

Répartition des tourbières. — Pourvu que l'atmosphère

soit humide, la température peu élevée et l'eau toujours limpide, la nature et la pente du sol importent peu à la formation des tourbières. On en trouve sur le fond plat des vallées à versants perméables, dans les dépressions des hautes vallées jurassiennes, mais aussi sur des pentes assez raides, sur des amoncellements de blocs granitiques, parfois même sur des escarpements où la tourbe est suspendue et aérienne. En revanche, l'arrivée d'eaux limoneuses dans un bassin tourbeux suffit pour arrêter immédiatement la végétation des mousses.

Les tourbières atteignent leur principal développement dans les régions tempérées froides. Tandis que, dans le Jura et les Vosges, on n'en voit guère au-dessous de 800 mètres d'altitude, elles occupent d'immenses espaces presque au niveau de la mer en Irlande, en Écosse, dans l'Allemagne du Nord et dans l'ouest de la Russie. C'est là que, sous l'influence d'un climat humide mais moyennement rigoureux, sur un sol dépourvu de pentes caractérisées, se forment ces grands marais tourbeux, dont le centre finit par être plus élevé que les bords, parce que la croissance des mousses y est plus active, et où les grandes pluies provoquent le gonflement et le débordement du marais.

Les vallées crayeuses du nord de la France ont leur fond garni de tourbe, parce que les rivières qui les arrosent, uniquement alimentées par des sources, n'ont pu combler leur ancien lit majeur ni avec du sable, ni avec du limon. Les versants, qui sont essentiellement perméables, laissent partout suinter des eaux limpides qui, cheminant sans vitesse appréciable sur le fond plat de la vallée, sont dans les conditions voulues pour l'établissement d'une végétation tourbeuse.

Modes divers de formation de combustibles minéraux. — Ce n'est pas en raison de leur composition chimique que les mousses sont le principal agent de la formation de la tourbe; car cette composition diffère très peu de celle de la fibre ou de l'écorce du bois. C'est parce que les mousses sont les plantes qui s'accommodent le mieux des conditions physiques sous l'empire desquelles s'opère de préférence la transformation en combustible de la matière végétale. Mais cette transformation peut avoir lieu dans d'autres circonstances, notamment lorsqu'une forêt a été détruite par un ouragan et que ses débris achevé-

trés, tombés en travers des cours d'eau, ont été noyés par le débordement de ces derniers. Dans ce cas, c'est la fibre et l'écorce du bois qui se décomposent, et si le produit final n'a pas exactement la même texture que la tourbe de mousses, du moins il en diffère très peu par sa teneur en carbone, hydrogène et oxygène.

Même dans les pays chauds, où l'ardeur du soleil empêche, par l'évaporation qu'elle provoque, l'établissement des tourbières, un combustible fossile peut encore se former dans les deltas des grands fleuves. Tantôt c'est par le dépôt des troncs d'arbres et autres plantes, flottés en temps de crues; tantôt c'est par l'enfouissement périodique, sous de nouvelles alluvions vaseuses, des végétations de roseaux, de cyprès, même de chênes verts, qui avaient réussi à se développer, dans l'intervalle de deux crues exceptionnelles, sur des atterrissements de récente formation. Ce phénomène s'est répété fréquemment à l'embouchure du Mississipi, et il est probable qu'à d'autres époques géologiques ce mode de dépôt a dû jouer un rôle plus considérable.

Dépôts marins formés par les foraminifères et les diatomées. — Tandis qu'à la surface des continents, les végétaux, et surtout ceux d'ordre inférieur, s'appliquent non seulement à fixer dans le sol des éléments, carbone, hydrogène et oxygène, primitivement contenus dans l'air, mais encore à emmagasiner dans l'écorce du globe, sous forme de combustibles, une partie de l'énergie solaire qui les avait fait croître, un travail également remarquable s'accomplit dans les océans, sous l'influence des animaux les moins élevés en organisation. Par eux les sels de chaux en excès dans l'eau de mer sont décomposés et employés à construire des enveloppes calcaires, dont l'accumulation fait naître à la longue de puissantes assises.

Près des rivages, cette fonction est souvent remplie par des algues calcaires, dites *nullipores*. Loin des côtes, dans ces espaces pélagiques où nous avons vu que la sédimentation mécanique ne pouvait plus s'exercer, les eaux superficielles nourrissent, surtout dans les régions chaudes, une abondante population d'êtres microscopiques, appelés *foraminifères*. Parmi eux dominant les *globigérines*, munies d'enveloppes calcaires

grosses comme des têtes d'épingles. Ces enveloppes de globigérines tombent en pluie continue sur le fond et y constituent des couches d'une vase blanchâtre, extrêmement riche en carbonate de chaux. D'autres fois, des courants chauds, comme le Gulf-stream, amènent dans l'océan une riche provision de matières nutritives, grâce auxquelles des mollusques, des oursins et des polypiers se développent en abondance sur le lit de la mer, au-dessous du parcours des courants, construisant par l'entassement de leurs dépouilles des trainées de calcaires blancs solides. Enfin, il est des cas où la profondeur d'eau est trop grande pour permettre la conservation des coquilles si fragiles des globigérines, incapables de se maintenir intactes sous une colonne d'eau de plus de 4000 mètres, et alors, dans le Pacifique, on voit parfois le fond se tapisser des enveloppes de foraminifères siliceux, dits *Radiolaires*, qui absorbent l'excès de silice introduit dans la mer par les fleuves.

Quant aux latitudes fréquentées par les glaces flottantes, l'eau de surface y est souvent habitée par des myriades de petites algues, appelées *diatomées*, dont les frustules siliceux, mêlés aux enveloppes de radiolaires, forment une vase à *diatomées*, espèce de farine siliceuse douce au toucher.

Tous ces dépôts s'effectuent avec une grande lenteur, et c'est par millimètres seulement que paraît devoir se compter, en général, l'épaisseur formée dans le cours de plusieurs siècles.

Travail des coraux. — Le travail de conquête que les foraminifères poursuivent dans le silence et l'obscurité des profondeurs océaniques, les coraux l'accomplissent à leur tour près des côtes, au milieu de l'agitation des flots de la surface. Si les massifs qu'ils élèvent couvrent peut-être une moindre étendue, en revanche l'édifice est beaucoup plus solide et bien plus rapidement construit.

Les *polypiers constructeurs*, ou *coralligènes*, sont des animaux inférieurs, ayant l'apparence de plantes (fig. 11 et 12), d'où le nom de *zoophytes*, et vivant en colonies, tantôt sous forme de petits arbres ramifiés, tantôt en masses sphéroïdales ou lenticulaires. Chacun d'eux sécrète, sans doute aux dépens du sulfate de chaux de l'eau de mer, une sorte de squelette calcaire. La réunion de tous les individus de la colonie constitue une

masse qui s'accroît sans cesse par le sommet ou la surface, tandis que la base meurt, laissant en place l'édifice calcaire dépouillé de matière organique. La vague remanie et brise en partie le produit de ce travail, et les fragments qu'elle arrache, en retombant dans les interstices des individus, finissent par s'y souder, grâce au dépôt du calcaire dissous dans les eaux environnantes. Ainsi se constitue un édifice compact, appelé *récif corallien*.

Les polypiers proprement dits sont aidés dans leur œuvre par des *bryozoaires*, petits mollusques formant des colonies calcaires; par des *hydrozoaires*, animaux alliés aux méduses;



Fig. 11. — *Dendrophyllia nigrescens*.



Fig. 12. — *Astræa pallida*.

Espèces coralligènes.

enfin par des *algues*, telles que les *nullipores*, qui étalent sur le bord des récifs des lames calcaires d'une grande solidité.

Les conditions absolument nécessaires au développement des organismes coralligènes sont les suivantes : la température de l'eau ne doit jamais s'abaisser, même dans le mois le plus froid, plus bas que *vingt degrés centigrades au-dessus de zéro*. L'eau doit être exempte de sédiments en suspension. Enfin la profondeur du soubassement sur lequel s'établit la végétation corallienne ne doit pas dépasser vingt brasses ou 37 mètres.

Émerison des récifs. Leurs principales variétés. — Quand ces conditions sont remplies (et elles ne peuvent l'être aujourd'hui que dans la zone tropicale), les récifs prospèrent au voisinage des côtes, s'exhaussant en moyenne de 1 à 2 millimètres par an, jusqu'à ce qu'ils aient atteint le niveau de la

basse mer; car les polypiers ne peuvent supporter une émerison trop prolongée. A ce moment le travail des organismes prend fin et le récif se signale à haute mer par une ligne de brisants. Mais la conquête du massif au profit de la terre ferme n'est pas encore complète. C'est aux vagues de tempêtes à achever l'œuvre, en détachant, du bord du récif, de gros fragments de roche corallienne, déjà perforés par des mollusques *lithophages*, et en les projetant à la surface. Par là le récif s'élève peu à peu et parvient enfin à dépasser en quelques points le niveau des hautes eaux. Bientôt le vent et la mer y apportent des semences végétales et il ne reste plus à l'homme qu'à prendre possession de ces îlots.

On constate que les coraux et, avec eux, les récifs, se développent mieux du côté de la haute mer, c'est-à-dire là où ils reçoivent les chocs les plus violents. Suivant les circonstances, les récifs sont collés à la côte qui a fourni la plate-forme nécessaire à leur premier établissement (*récifs frangeants*), ou séparés d'elle par un canal assez large (*récifs-barrières*), ou enfin tout à fait annulaires et enfermant une lagune intérieure (*atolls*). De toutes manières, en même temps qu'ils représentent une conquête opérée sur la mer par les êtres vivants, ils forment, autour des îles qui leur servent d'appui, une ceinture protectrice, amortissant le choc des vagues, sous l'effort desquelles beaucoup de ces îles, composées de matériaux peu cohérents, n'eussent pas tardé à disparaître.

Roches coralliennes diverses. — Tandis que le bord des récifs est constitué par un mélange de coraux en place et de menus débris, cimenté en un calcaire compact, les parties tournées vers l'intérieur, et auxquelles a manqué le choc violent des vagues, donnent naissance à un calcaire plus tendre, les interstices des coraux ne pouvant être comblés que par une sorte de vase crayeuse. La plage même est occupée par des sables coralliens, composés de menus morceaux roulés. Souvent les infiltrations, aidées par la puissante évaporation des contrées tropicales, amènent, autour de ces grains de sable, le dépôt d'enveloppes concentriques de carbonate de chaux, donnant naissance à des *oolithes*, ainsi nommées de leur ressemblance avec des œufs de poissons. Enfin la même cause, en

agglomérant les sables à oolithes, les transforme en *calcaires oolithiques*. Quant à la zone située au large des récifs, il s'y dépose une *vase calcaire* blanche à grain impalpable.

Épaisseur des récifs. — D'après ce qui a été dit précédemment, aucun récif corallien ne devrait avoir plus d'une quarantaine de mètres d'épaisseur. Cependant il arrive quelquefois que ce chiffre soit notablement dépassé. Voici comment on peut s'en rendre compte¹ :

La plupart des récifs polynésiens ont pour base des cônes volcaniques sous-marins, rasés par les vagues juste à la hauteur qui convient à l'établissement des espèces coralligènes, et qui est aussi celle où cesse la puissance mécanique des lames. Au pied du *bord vivant* du récif, qui souvent est vertical, la sonde rencontre un talus escarpé, formé par un entassement de blocs calcaires, que les vagues de tempêtes ont détachés du couronnement du récif et jetés sur la pente raide du cône sous-jacent. Ce talus, cimenté à la longue en une masse solide, grâce à la chute de menus fragments dans les intervalles des blocs, peut fournir par sa crête une nouvelle plate-forme, propre à servir d'assiette à des coraux. De cette manière, le récif avancerait vers la pleine mer, reposant alors sur un soubassement formé de ses propres débris et dont rien, *a priori*, ne limite la hauteur. D'ailleurs, la croissance du récif étant plus rapide du côté de la pleine mer, le bord extérieur d'une construction corallienne pourra s'élever plus vite et dépasser seul le niveau de l'eau. Ainsi une ancienne plate-forme se transformera naturellement, avec le temps, en un récif annulaire ou atoll.

D'autres fois, au lieu de s'élever directement sur une plate-forme, volcanique ou non, le récif se développera au-dessus d'un banc calcaire, préalablement édifié par des foraminifères ou autres animaux; et les deux masses, en devenant compactes avec le temps, paraîtront n'en plus former qu'une seule.

En dehors de ces possibilités, l'accroissement en hauteur d'un récif est forcément interrompu dès que son couronnement atteint le niveau des mers moyennes, à moins qu'un affaissement du sol ne permette une nouvelle reprise du travail des coraux.

1. Voir les observations faites par M. J. Murray dans la croisière du *Challenger*.

CHAPITRE III

DYNAMIQUE TERRESTRE INTERNE

§ 1

PHÉNOMÈNES VOLCANIQUES

Principe de la dynamique interne. — Le caractère commun de tous les agents extérieurs, c'est d'abord que leur action se partage en périodes, relativement courtes, de grande activité, séparées par des intervalles de repos, absolu ou relatif. C'est ensuite que tous tendent naturellement vers un état d'équilibre, dont l'établissement définitif réduirait à néant leur rôle dynamique. Par suite, au bout d'un temps plus ou moins long, les forces naturelles arriveraient partout au repos, si quelque cause n'intervenait périodiquement pour troubler les états d'équilibre acquis.

Cette cause existe et elle a son siège dans les profondeurs du globe terrestre. Comme la dynamique externe consistait dans l'action des fluides extérieurs sur l'écorce, le principe nouveau dont l'analyse va nous occuper est l'effort que cette même écorce subit par suite de l'existence de fluides intérieurs, effort qui a pour résultat de modifier l'assiette et le relief de la terre ferme, ravivant sans cesse l'activité, prête à s'endormir, des puissances externes. Enfin, de même que le principe des phénomènes extérieurs est la chaleur solaire, de même la source d'où dérivent les actions internes est l'énergie calorifique propre au globe terrestre. La manifestation la mieux caractérisée de cette énergie s'offrant à nous sous la forme des *phénomènes volcaniques*, c'est par là que nous aborderons l'examen.

Volcans. Éruptions. — Un *volcan* est un appareil par lequel la surface du globe est mise en communication, d'une manière continue ou intermittente, avec les matières fluides situées au-dessous de l'écorce.

agglomérant les sables à oolithes, les transforme en *calcaires oolithiques*. Quant à la zone située au large des récifs, il s'y dépose une *vase calcaire* blanche à grain impalpable.

Épaisseur des récifs. — D'après ce qui a été dit précédemment, aucun récif corallien ne devrait avoir plus d'une quarantaine de mètres d'épaisseur. Cependant il arrive quelquefois que ce chiffre soit notablement dépassé. Voici comment on peut s'en rendre compte¹ :

La plupart des récifs polynésiens ont pour base des cônes volcaniques sous-marins, rasés par les vagues juste à la hauteur qui convient à l'établissement des espèces coralligènes, et qui est aussi celle où cesse la puissance mécanique des lames. Au pied du *bord vivant* du récif, qui souvent est vertical, la sonde rencontre un talus escarpé, formé par un entassement de blocs calcaires, que les vagues de tempêtes ont détachés du couronnement du récif et jetés sur la pente raide du cône sous-jacent. Ce talus, cimenté à la longue en une masse solide, grâce à la chute de menus fragments dans les intervalles des blocs, peut fournir par sa crête une nouvelle plate-forme, propre à servir d'assiette à des coraux. De cette manière, le récif avancerait vers la pleine mer, reposant alors sur un soubassement formé de ses propres débris et dont rien, *a priori*, ne limite la hauteur. D'ailleurs, la croissance du récif étant plus rapide du côté de la pleine mer, le bord extérieur d'une construction corallienne pourra s'élever plus vite et dépasser seul le niveau de l'eau. Ainsi une ancienne plate-forme se transformera naturellement, avec le temps, en un récif annulaire ou atoll.

D'autres fois, au lieu de s'élever directement sur une plate-forme, volcanique ou non, le récif se développera au-dessus d'un banc calcaire, préalablement édifié par des foraminifères ou autres animaux; et les deux masses, en devenant compactes avec le temps, paraîtront n'en plus former qu'une seule.

En dehors de ces possibilités, l'accroissement en hauteur d'un récif est forcément interrompu dès que son couronnement atteint le niveau des mers moyennes, à moins qu'un affaissement du sol ne permette une nouvelle reprise du travail des coraux.

1. Voir les observations faites par M. J. Murray dans la croisière du *Challenger*.

CHAPITRE III

DYNAMIQUE TERRESTRE INTERNE

§ 1

PHÉNOMÈNES VOLCANIQUES

Principe de la dynamique interne. — Le caractère commun de tous les agents extérieurs, c'est d'abord que leur action se partage en périodes, relativement courtes, de grande activité, séparées par des intervalles de repos, absolu ou relatif. C'est ensuite que tous tendent naturellement vers un état d'équilibre, dont l'établissement définitif réduirait à néant leur rôle dynamique. Par suite, au bout d'un temps plus ou moins long, les forces naturelles arriveraient partout au repos, si quelque cause n'intervenait périodiquement pour troubler les états d'équilibre acquis.

Cette cause existe et elle a son siège dans les profondeurs du globe terrestre. Comme la dynamique externe consistait dans l'action des fluides extérieurs sur l'écorce, le principe nouveau dont l'analyse va nous occuper est l'effort que cette même écorce subit par suite de l'existence de fluides intérieurs, effort qui a pour résultat de modifier l'assiette et le relief de la terre ferme, ravivant sans cesse l'activité, prête à s'endormir, des puissances externes. Enfin, de même que le principe des phénomènes extérieurs est la chaleur solaire, de même la source d'où dérivent les actions internes est l'énergie calorifique propre au globe terrestre. La manifestation la mieux caractérisée de cette énergie s'offrant à nous sous la forme des *phénomènes volcaniques*, c'est par là que nous aborderons l'examen.

Volcans. Éruptions. — Un *volcan* est un appareil par lequel la surface du globe est mise en communication, d'une manière continue ou intermittente, avec les matières fluides situées au-dessous de l'écorce.

Les volcans peuvent offrir des formes très variées; mais leur type le plus normal comporte une *cheminée*, ou canal d'ascension, qui vient déboucher, par une ouverture en forme de coupe ou *cratère*, au sommet d'une montagne conique. L'existence du foyer interne se traduit au sommet de la montagne par un dégagement de gaz, formant le *panache de fumée*, caractéristique des volcans actifs.

En temps ordinaire, le dégagement des fumées n'est accompagné que par d'insignifiantes explosions. Mais de temps à autre surviennent des *éruptions violentes* ou *paroxysmes volcaniques*. Tout d'abord, après quelques grondements préliminaires du sol, une colonne de vapeur d'eau s'élance verticalement avec une grande vitesse, jusqu'à une hauteur capable de dépasser onze mille mètres, entraînant avec elle des pierres et des cendres, qui retombent à droite et à gauche. Cette colonne est formée d'une rapide succession de nuages blancs, qui montent l'un après l'autre vers le ciel et dont chacun est le produit d'une explosion interne. A la suite de cette grande manifestation explosive, un courant de *lave*, c'est-à-dire de pierre fondue, s'échappe, soit par-dessus le bord du cratère, soit par une *fente* qui s'est ouverte sur les flancs du cône. Dans ce dernier cas, il se forme sur la fente plusieurs centres secondaires d'éruption, dont chacun projette, pendant quelques heures ou quelques jours, des cendres et des scories. L'accumulation de ces débris édifie des *cônes adventifs*, pouvant atteindre jusqu'à 300 mètres de hauteur.

Émission des laves. — Le fait capital des éruptions volcaniques est la sortie des *laves*. On appelle ainsi des coulées de matières fondues, de composition très variable, mais qui toutes sont formées de *silicates*, c'est-à-dire de substances analogues à celles qui constituent les laitiers de hauts fourneaux et les scories de forge. Ces coulées, en se refroidissant, donnent naissance à des roches solides.

Il y a des laves légères, riches en silice, et des laves lourdes, chargées d'éléments ferrugineux; quelques-unes sont très fluides et d'autres seulement pâteuses. Tantôt le refroidissement donne une roche compacte (*laves lithoïdes*) ou une roche vitreuse (*laves vitreuses, obsidiennes*), tout à fait analogue au verre à bouteilles; tantôt la lave solide est entièrement cristallisée ou montre des

cristaux nets qui se détachent sur une pâte compacte. D'autres fois elle est parsemée de cavités dues à l'échappement des gaz (*laves scoriacées, laves celluleuses, laves amygdaloïdes*).

Les laves vitreuses se solidifient à la manière des laitiers de forge, en replis ondulés (*laves cordées*), comme le montre la figure 13 (qui représente aussi un cône creux de scories, formé

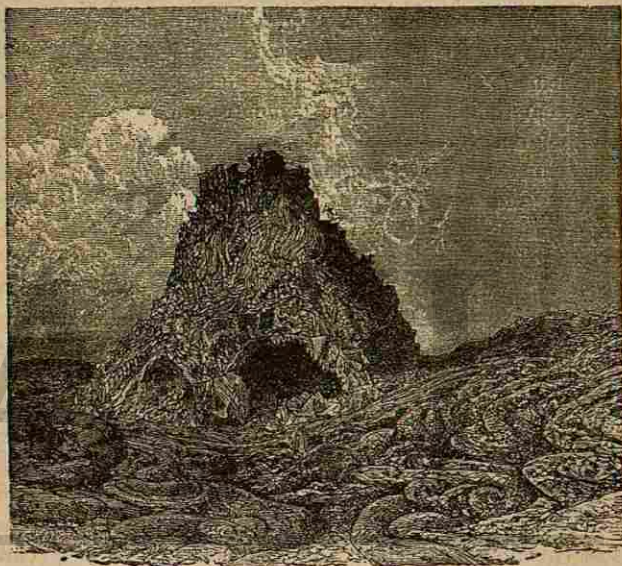


Fig. 13. — Laves cordées de l'île Bourbon, avec cône creux de scories.

par gonflement à la surface d'une coulée). Les laves peu fusibles se couvrent, dès leur arrivée à l'air, d'une croûte de scories incohérentes, qu'elles poussent devant elles en les heurtant les unes contre les autres, à mesure que le front de la coulée progresse, et qui donnent à la surface cet aspect raboteux et hérissé, si caractéristique des *cheires* d'Auvergne.

Vitesse, température et dimensions des coulées. — La vitesse de progression des coulées de lave est extrêmement variable. Tandis que les laves remarquablement fluides des îles Sandwich parcourent plusieurs mètres par seconde, la vitesse

des coulées du Vésuve varie ordinairement entre 2 mètres et 1 centimètre dans le même temps.

La température des laves liquides est considérable et dépasse certainement *mille degrés*. Cependant leur action calorifique ne s'étend pas au delà d'un rayon très restreint et il en est qui, débouchant dans un bois de sapins, se sont contentées de carboniser les troncs, en se moulant autour de l'écorce, dont elles conservaient l'empreinte. On a vu, à l'Etna, des laves couler, sans les fondre, par-dessus des champs de neige, dont les séparait seulement une couche de petites pierres et de cendres. Ce fait est remarquable et rien ne démontre mieux la faible conductibilité des roches que cette impuissance calorifique des laves, comparée à leur énorme température.

La plus grande coulée des temps modernes est celle qui s'est échappée en 1835 et 1836 du Mauna Loa aux îles Sandwich. Elle avait 100 kilomètres de long, 4800 mètres de largeur moyenne et, en certains points, jusqu'à 108 mètres d'épaisseur. Au Vésuve, la coulée de 1794 représentait plus de 23 millions de mètres cubes. A l'île Bourbon, on a observé des coulées de 68 et même de 86 millions de mètres cubes.

Relation des laves et des débris projetés. — Les pierres projetées par les volcans sont, ou bien des débris du cône terminal, plus ou moins démolis par chaque explosion partielle, ou des morceaux de la croûte de scories qui recouvrait la lave dans le cratère, ou des fragments de la lave visqueuse qui remplit la cheminée de certains volcans d'une sorte de pâte semi-fluide, ou enfin ce qu'on appelle improprement des *cendres*, qui ne sont autre chose que de la lave solidifiée dans un grand état de division. Dans ce dernier cas, c'est la vapeur d'eau qui, en faisant explosion à travers la masse fondue, la réduit en gouttelettes; celles-ci, rapidement solidifiées à l'air, prennent, si la lave est vitreuse, cet état particulier qui caractérise les gouttes de verre fondu, brusquement refroidies par immersion, et qui les prédispose à éclater en menus fragments esquilleux. Les dimensions minimales de ces fragments et la force prodigieuse avec laquelle ils sont projetés leur permettent d'arriver dans les hautes régions de l'atmosphère, où les courants les emportent et leur font parcourir des espaces considérables.

Avec les laves très chargées de silice, les explosions de vapeur donnent naissance à des projections de *pierre ponce*, essentiellement poreuse et légère.

Formation des cratères. — Nous avons dit que la cheminée par laquelle ont lieu les projections principales et l'ascension des laves se termine ordinairement par un *cratère*. C'est une ouverture à peu près circulaire, qui, en général, tronque le cône de débris construit par le volcan lui-même à l'aide des matériaux rejetés. Ces matériaux, en effet, retombant autour de l'ouverture, y font naître une montagne conique,

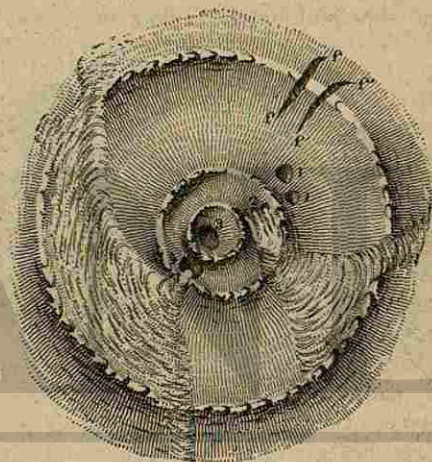


Fig. 14. — Le cratère du Vésuve en 1867. — ff, f f, grandes fissures; 1, 1, bouches inactives; 2, 3, 4, bouches en activité.

ordinairement très régulière, constituée de couches successives inclinées en moyenne de 35 à 45 degrés, et incessamment remaniée, au moins à son sommet, lors des paroxysmes. Ainsi le cône du Vésuve est tantôt terminé par un véritable abîme cratériforme, de 700 mètres de diamètre avec une centaine de mètres de profondeur, au fond duquel la croûte qui recouvre la lave laisse s'élever des cônes secondaires, tantôt rempli jusqu'au bord, comme en 1867 (fig. 14), par de la lave disparaissant sous une couche de scories, d'où s'échappent par plusieurs ouver-

tures des coulées débordant par-dessus le cratère. Parfois on vu le sommet de l'ancien cratère, absolument rempli, servir de base à un plus petit cône et même à deux cônes emboîtés l'un dans l'autre.

Le cratère terminal de l'Etna, également très variable, a été quelquefois entièrement démoli par une explosion, pour être reconstruit, tantôt simple, tantôt double, par les éruptions suivantes.

Quand le débordement des laves est le fait habituel, comme à l'île Bourbon, le cratère, au lieu de s'ouvrir au sommet d'un cône de débris projetés, est une ouverture qui s'est maintenue à travers une superposition de coulées successives (fig. 15),

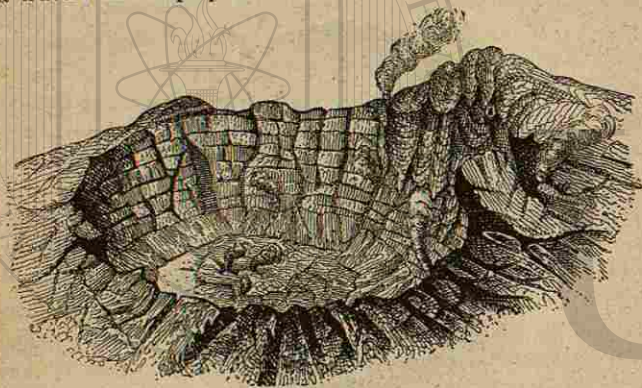


Fig. 15. — Cratère du Piton de la Fournaise (île Bourbon).

dont les tranches apparaissent sur les parois de la cavité. Au fond bouillonne la lave, qui peut s'élever en temps d'éruption jusque par-dessus les bords, et dont les coulées visqueuses retombent et se figent en partie sur les parois intérieures, en forme de stalactites simulant des draperies.

Certains volcans ne rejettent jamais que des laves et en construisent à la longue des montagnes de très grande hauteur, mais à faible pente, comme le Mauna Loa et le Mauna Kea des îles Sandwich, qui s'élèvent à plus de 4200 mètres.

Fragilité des cônes de débris. — Les cônes de débris, quand ils ne sont pas consolidés par l'injection ultérieure de laves,

restent dépourvus de cohésion et sont menacés de disparaître plus ou moins vite sous l'effort des agents atmosphériques, la pluie ayant beau jeu, malgré leur perméabilité, pour y creuser des rigoles dans tous les sens. Aussi dans les pays tropicaux, comme à Java, voit-on les cônes des volcans inactifs se ruiner peu à peu par ravinement. Cependant cette destruction ne marche pas en général avec une grande rapidité, comme en témoigne la fraîcheur de la plupart des cônes de la chaîne du Puy-de-Dôme, en Auvergne, dont la formation a précédé les temps historiques.

Mais s'il s'agit de volcans situés en mer, les vagues peuvent les disperser en quelques semaines. C'est ce qui est arrivé en 1831, à l'île Julia, qui avait pris naissance subitement, par projection de débris, au sein de la Méditerranée. Si l'île Saint-Paul, dans l'océan Indien, a mieux résisté, bien que la mer ait libre accès dans son cratère inactif, c'est que les laves ont pris une grande part à sa formation. Bon nombre de cônes de débris ont été ainsi rasés par les vagues dans l'océan Pacifique et se sont changés en plates-formes sous-marines, propres à servir d'assiette aux constructions coralliennes.

Formation des montagnes volcaniques. Tufs. — A force de se répandre autour de l'ouverture, les coulées successives, mêlées aux débris projetés par la cheminée centrale et par les cônes adventifs, exhaussent peu à peu le massif. Il en résulte à la longue des montagnes considérables, comme les volcans du Kamtschatka et du Japon, hauts de plus de 4000 mètres, ou comme l'Etna, qui dépasse 3300 mètres.

Cette dernière montagne offre une *gibbosité* principale, constituée par un enchevêtrement de laves et de débris en couches, que domine le cône terminal, haut d'environ 300 mètres.

Par suite de leur peu de consistance, les cônes de débris, ébranlés par les explosions, se fendent facilement sous l'effort de la lave en pression dans la cheminée et la matière fondue tend le plus souvent à s'échapper latéralement. C'est donc à la base du cône de débris que doit se former, par l'accumulation des coulées, un massif de moindre pente, tel que la *gibbosité* de l'Etna.

En outre, les pluies abondantes dont la chute accompagne

les éruptions entraînent, sous forme de *déluges de boue*, des cendres et des pierres, et le tout s'agglomère au pied de la montagne en donnant naissance à des *tufs volcaniques*. Ce sont des formations qui participent, à la fois, des roches éruptives par leur nature et des terrains sédimentaires par leur mode de dépôt. Des tufs se forment encore, et avec une stratification plus parfaite, quand les débris projetés sont venus tomber dans un lac ou dans la mer. Tel est le cas des *tufs sous-marins* avec coquilles des environs de Naples, de certains *tufs ponceux* et de beaucoup de *cinérites* ou amas stratifiés de cendres, grises ou blanches, avec ou sans empreintes végétales.

De cette manière, un volcan normal doit offrir : 1° au pied, une pente très faible, formée de tufs ; 2° au milieu, un bombement plus accentué, où dominent les laves ; 3° au sommet, la pente raide et régulière du cône terminal de débris.

Modes divers d'épanchement des laves. — Les laves offrent deux manières d'être distinctes : dans la première, elles ont coulé à l'air libre, soit par déversement, soit par une fente, et alors elles forment des *nappes* plus ou moins larges, d'une épaisseur assez uniforme, compactes à la base, cellulées ou scoriacées en haut. Ces coulées ont en général une inclinaison faible ; cependant on a vu des laves couler et se solidifier sans irrégularités sur des pentes supérieures à 30 degrés. Dans le second mode, les laves, après avoir commencé par s'élever dans la cheminée, ont fini par y acquérir une pression considérable, qui a suffi pour les injecter dans les fissures du cône ou même dans celles du terrain qui porte ce dernier. Ce cas est fréquent à l'Etna, où l'on voit des fentes remplies par de véritables *filons* de lave, souvent verticaux et qui demeurent en saillie sur les escarpements (c'est ce qu'on appelle des *dykes*), lorsque l'érosion a fait disparaître en partie les matériaux meubles au milieu desquels la lave s'était introduite. Mais les fentes d'injection ou d'intrusion ne sont pas nécessairement verticales et il peut très bien arriver que la cheminée centrale ayant été remplie par une haute colonne de lave, la matière liquide trouve à s'échapper entre deux couches de débris, en partageant leur inclinaison. Alors la lave injectée se consolide sous la forme d'une nappe, qui semble avoir coulé librement sur la pente

même du cône, mais qui reste compacte dans toute sa masse à cause de la pression sous laquelle s'est opérée sa solidification.

Enfin les volcans à débordement de lave dont le cône a une très forte pente, comme le Cotopaxi, donnent naissance à des coulées *discontinues*. La lave, descendant avec une trop grande vitesse pour pouvoir se concentrer en un courant défini, se solidifie par portions et on la retrouve, au pied du cône, à l'état de trainées de gros blocs.

Un mode particulier d'émission de laves est offert par certains volcans, tels que celui de Santorin, dans l'Archipel grec. Les explosions et les coulées, d'ailleurs très intermittentes, y ont toujours été précédées par une période d'*intumescence*, se traduisant par l'apparition, au milieu de la baie de Santorin, d'îlots formés par des blocs à demi incandescents d'une lave visqueuse, très siliceuse. On doit admettre que, vu la faible fusibilité de la lave, sa solidification se fait à moitié dans la cheminée, où elle forme une sorte de tampon de matière pâteuse. A chaque éruption, l'effort des gaz intérieurs doit soulever ce tampon comme une ampoule, avant de s'y ouvrir un chemin qui permette les projections violentes de scories et de cendres ainsi que les vraies coulées de lave.

Modes divers de l'activité volcanique. — L'activité des volcans comporte des manifestations très diverses. La plus habituelle consiste dans une succession irrégulière de paroxysmes, séparés par des périodes de repos, et d'autant plus violents, en général, que ces intervalles ont été plus longs. Ainsi les deux plus fortes éruptions du Vésuve furent celle de 79, où périt Plin et qui était la première révélation du volcan depuis les temps historiques ; ensuite celle de 1631, précédée par plusieurs siècles d'inaction.

Il y a aussi des volcans en éruption constante, comme le Stromboli, mais où les explosions et les épanchements de lave ne dépassent jamais un certain degré d'intensité, si bien que cet état d'activité modérée, mais permanente, a pu être qualifié de *mode strombolien*. Aux îles Sandwich, la lave ne cesse de bouillonner dans la chaudière de Kilauea, bien que celle-ci se vide parfois pour un moment et que son niveau

subisse de grandes oscillations. Mais les projections et les explosions font absolument défaut. Au contraire, à Java et dans les îles voisines, il n'y a pas d'émissions de lave liquide; mais les projections sont d'une extrême violence. L'explosion du Temboro, en 1825, a couvert, dans un rayon de 500 kilomètres, la région avoisinante d'une masse de débris évaluée à plusieurs centaines de kilomètres cubes. Celle de Krakatoa, survenue en 1883, a projeté en deux jours dix-huit kilomètres cubes, et l'effondrement qui en a été la conséquence a fait naître dans la mer une immense vague de 15 à 25 mètres de hauteur, pénétrant sur les côtes de Sumatra et de Java jusqu'à trois kilomètres dans l'intérieur des terres et causant la mort de trente à quarante mille habitants.

Cratères d'explosion et d'effondrement. — Ces explosions extraordinaires rendent facilement compte d'une structure propre à certains volcans et qui consiste dans l'existence d'une sorte de rempart circulaire plus ou moins complet, entourant à quelque distance le cône principal. Le type de ces remparts est réalisé, au



Fig. 16. — Le Vésuve et la Somma.

Vésuve par la Somma (fig. 16), à l'île Bourbon par l'Enclos du Piton Bory (fig. 17), aux îles Canaries par la célèbre chaudière ou Caldeira de Palma.



Fig. 17. — L'Enclos et le Piton Bory.

De telles ouvertures doivent être considérées comme le résultat d'explosions gigantesques, parfois accompagnées d'effondrements, ayant fait sauter comme à la mine le sommet d'un ancien volcan, plus grand que le cône actuel, lequel a été ulté-

rieurement édifié par les projections au milieu de l'ouverture béante. Cette explication pourrait convenir à la formation du grand cirque de Santorin. C'est aussi par explosion que paraissent avoir pris naissance les célèbres *cratères-lacs* ou *maare* de l'Eifel, la cavité du lac Pavin en Auvergne, peut-être enfin les lacs d'Albano et de Nemi, dans le Latium. Pour quelques-unes de ces cavités, le fait de l'explosion n'est pas douteux; car elles sont ouvertes au milieu de terrains qui n'ont rien de volcanique et l'on trouve disséminées sur leurs bords quelques scories, parfois des pierres vitrifiées provenant du terrain sous-jacent. Il est donc évident qu'elles ont pris naissance à la suite d'explosions et qu'on peut les regarder comme des volcans avortés, où la projection des gaz et des pierres n'a pas été suivie par l'émission de laves.

D'autres fois, des cavités arrondies se seront produites par simple effondrement, une coulée de lave s'étant solidifiée au-dessus d'un terrain peu cohérent, qui s'est écroulé plus tard; ou bien encore, comme aux îles Sandwich, une lave très chaude, injectée à travers les fentes d'une ancienne coulée, l'aura partiellement refondue, entraînant l'effondrement de la surface.

Fumerolles. — Pour terminer l'énumération des phénomènes qui sont sous la dépendance immédiate de l'activité volcanique, il reste à parler des *émanations gazeuses* tranquilles qui accompagnent et suivent la sortie des laves, faisant naître, sur les fentes, les dégagements de fumées auxquels on a donné le nom de *fumerolles*.

De la lave très chaude se dégagent d'abord, par simple évaporation sans bouillonnement, des fumerolles blanches et sèches, à très haute température, formées surtout de sel marin en vapeurs. Plus tard on voit apparaître, près des parois de la coulée, des émanations de vapeur d'eau à 300 ou 400 degrés, rendues acides par la présence des gaz chlorhydrique et sulfureux. Plus loin encore du foyer principal d'éruption, les fumerolles sont alcalines et chargées de sel ammoniac (sans que la vapeur d'eau cesse de prédominer de beaucoup), avant de devenir froides et de n'être plus guère composées que de vapeur d'eau au-dessous de cent degrés, mêlée à de l'hydrogène sulfuré. Enfin la série des émanations se termine par des *mofettes*, ou dégagements

d'*acide carbonique*, qui durent souvent des mois entiers après la fin des éruptions et même, dans certaines contrées autrefois volcaniques, survivent depuis de longs siècles à l'extinction des foyers éruptifs. L'*acide carbonique*, en raison de sa plus grande densité, s'accumule sur le sol, et c'est ainsi qu'à Naples, dans la célèbre *grotte du Chien*, les animaux de petite taille sont asphyxiés, tandis que la couche de gaz irrespirable n'est pas assez haute pour incommoder un homme.

Quand les fumerolles froides, au lieu de se dégager d'une fente à l'air libre, sont obligées de traverser d'abord une certaine épaisseur d'eau, on y constate la présence de l'*hydrogène* et celle des *hydrocarbures*, ou composés d'hydrogène et de carbone. Il est donc permis de penser que les gaz venant de l'intérieur du foyer incandescent s'oxydent dans les fissures, au contact de l'air, et que, dans leur état primitif, ce sont des vapeurs combustibles, se dégageant d'un milieu où dominaient les influences réductrices, c'est-à-dire contraires à l'oxydation.

Les substances métalliques, surtout le fer à l'état de chlorure, l'*acide borique*, les sulfures d'*arsenic*, doivent aussi être mentionnés parmi les produits gazeux des volcans.

Distribution des volcans. — Les volcans se rencontrent dans toutes les conditions possibles de longitude et de latitude. Il en existe près des pôles comme à l'équateur et on en peut trouver sous n'importe quel méridien.

Cependant la distribution n'en est aucunement arbitraire. En premier lieu, l'intérieur des continents actuels ne renferme aucun volcan actif. En revanche, les rivages de la mer sont souvent marqués par des lignes continues de bouches éruptives. On peut dire que l'océan Pacifique est entouré par un véritable *cercle de feu*. Ce cercle commence à la Nouvelle-Zélande et se poursuit, par les Nouvelles-Hébrides, les îles Salomon et les îles de la Sonde, jusqu'au Japon. De là, par les Kouriles il gagne le Kamtschatka, suit les Aléoutiennes, la côte occidentale de l'Amérique, le Mexique, le Guatemala, longe toute la chaîne des Andes et se referme par les îles Shetland et les cratères antarctiques Erebus et Terror. Le bord oriental de l'Atlantique est jalonné par le volcan de Jan Mayen, ceux de l'Islande, des

Açores, des Canaries, du Cap-Vert, d'Ascension, de Sainte-Hélène, de Tristan d'Acunha.

D'autre part, une ligne volcanique transversale se suit d'un bout à l'autre du globe, comprenant les Antilles, les Canaries, les volcans Méditerranéens, le Caucase, les cratères de l'océan Indien, ceux de la Polynésie, des îles Sandwich et des Galapagos. De plus, c'est un fait digne de remarque que l'activité volcanique est tout particulièrement énergique dans les régions centrales de l'Amérique et aux îles de la Sonde, c'est-à-dire aux points de rencontre de la ligne transversale avec le cercle de feu du Pacifique.

Coïncidence des volcans avec les lignes de dislocation. — Si la situation littorale ou insulaire des volcans est incontestable, ce n'est pas cependant par elle-même et directement que la mer intervient dans le phénomène volcanique. En effet, il importe de ne pas oublier que les volcans font défaut sur toutes les côtes plates ainsi qu'au voisinage des mers sans profondeur. On en chercherait vainement sur la Baltique ou sur la mer du Nord. Ils sont absents de toute la côte atlantique des États-Unis, comme de celle des Guyanes et du Brésil, et il n'en existe pas davantage sur les rivages de la Sibérie ni sur ceux de l'Australie.

Les lignes de côtes ou d'îles jalonnées par les volcans sont celles qui bordent de hautes chaînes, formant, comme les Andes, une brusque saillie, ou celles qui marquent le contour rectiligne d'une dépression océanique au flanc abrupt. Telles sont la côte asiatique du nord-est, au large de laquelle la sonde enregistre, à peu de distance, les plus grandes profondeurs du Pacifique, et la ligne des Antilles, crête en partie émergée d'un bourrelet, au delà duquel le fond de l'Atlantique descend plus vite et plus bas que partout ailleurs. De même, la grande ligne volcanique transversale que nous avons mentionnée coïncide avec cette dépression méditerranéenne, qui nous a paru constituer l'un des traits fondamentaux de la géographie actuelle¹.

On peut donc dire que *les volcans sont établis sur les grandes lignes de dislocation* de l'écorce terrestre, absolument comme

1. Voir, plus haut, page 6.

les cônes adventifs jalonnent le parcours des fentes à chaque éruption de l'Etna. Ils caractérisent les plus saillants parmi les bourrelets par lesquels sont limités les compartiments affaissés de la croûte solide, et il est naturel de penser que chaque bouche volcanique principale doit marquer un élargissement ou un croisement de fentes, ouvrant une voie plus facile à la sortie des fluides qui bouillonnent sous l'écorce.

Quant à la source de ces fluides et aux causes qui en déterminent la sortie, il convient d'attendre, pour émettre une hypothèse à cet égard, que nous ayons achevé la revue des manifestations de la Dynamique interne.

§ 2

PHÉNOMÈNES THERMAUX

Définition des phénomènes thermaux. — L'activité interne est loin d'avoir dit son dernier mot avec la projection des débris, la sortie des laves et l'émission des fumerolles. Longtemps après que tout paroxysme a cessé dans une contrée, il s'y produit en divers points des dégagements de vapeurs et de liquides à haute température, qu'on peut grouper sous la commune dénomination de *phénomènes thermaux*. Leur caractère essentiel est d'être localisés dans le voisinage immédiat des anciens centres volcaniques et de former la suite naturelle, sans cesse atténuée en intensité, des manifestations paroxysmales; absolument comme la succession ordonnée des fumerolles, depuis celles qui sont sèches et très chaudes jusqu'aux mofettes, marque la décroissance progressive de chaque éruption.

Solfatares. — De tous les phénomènes thermaux, ceux qui se rapprochent le plus de l'activité volcanique normale consistent en dégagements violents de vapeur d'eau, accompagnés de gaz dont l'odeur suffocante, jointe aux dépôts jaunâtres qui garnissent les orifices de sortie, trahit les composés du *soufre*. Aussi les désigne-t-on sous le nom générique de *solfatares* ou *soufrières*.

La solfatare la plus connue est celle de Pouzzoles, près de Naples, qui occupe un cratère dont la dernière éruption a eu

lieu en 1198. Les gaz sulfureux, se transformant en acide sulfurique par l'action de l'air et de l'eau, attaquent les roches, décomposent les silicates et font naître de l'*alunite*, ou pierre d'alun, ainsi que des efflorescences de sulfates divers. La décomposition de l'hydrogène sulfuré donne lieu aussi à des dépôts de *soufre natif*.

Les *soufflards* ou *soffioni* de la Toscane, qui forment des jets de 10 à 20 mètres de hauteur, alignés sur des fentes, et dont les bassins renferment de l'*acide borique*, sont aussi des solfatares. Il en est de même des jets de vapeur, dits *Steamboat Springs* ou *sources du bateau à vapeur*, de Californie. Seulement les gaz sulfurés y sont moins abondants que dans les solfatares typiques.

Un ancien volcan peut passer définitivement à l'état de solfatare, en attendant qu'une nouvelle diminution locale de l'activité interne le réduise à n'être plus qu'une mofette; mais il peut aussi, après s'être maintenu quelque temps dans cette condition, entrer de nouveau en éruption. Le *mode solfatarien* caractérise donc, dans le volcanisme, une phase de décroissance, mais qui n'exclut pas absolument tout retour au passé.

Geysers. — A la catégorie précédente se relie étroitement les *geysers*, si développés en Islande, en Nouvelle-Zélande et surtout dans le Parc National du Yellowstone en Amérique. Ce sont des dégagements intermittents, non plus de vapeur, mais d'eau chaude, projetée avec violence à des hauteurs qui peuvent dépasser 60 mètres (fig. 18) et donnant lieu, autour des orifices, à d'abondants dépôts concrétionnés de *silice hydratée*, dite aussi *opale commune* ou *geysérite*.

L'eau provient des infiltrations et sa température résulte de ce que cette eau est traversée par des émanations très chaudes, issues d'un foyer volcanique sous-jacent.

Les éruptions des geysers, toujours très courtes, sont intermittentes et se succèdent à des intervalles variables. Cette intermittence s'explique, d'abord par l'obligation de reconstituer à l'aide des infiltrations, après chaque paroxysme, le volume et la température de l'eau nécessaire à la formation de la gerbe; ensuite par l'échauffement très inégal des divers points de la cheminée d'ascension. En effet, certaines portions de celle-ci,

plus directement léchées par les gaz intérieurs, peuvent, à des moments déterminés, provoquer la vaporisation subite de l'eau

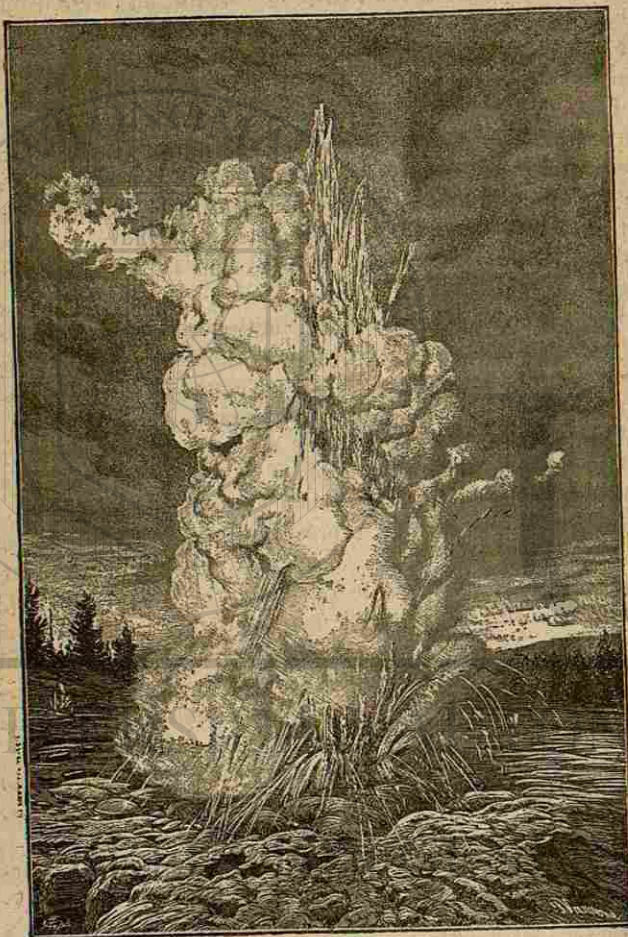


Fig. 18. — Le Grand Geysers du Yellowstone en éruption, en 1878.

qui, soulevée par les bulles de vapeur venant du bas, arrive à leur contact, d'où résulte une explosion.

Le dépôt de silice des geysers provient d'une réaction chimique très simple : les eaux chaudes attaquent les roches poreuses qu'elles traversent et leur enlèvent les silicates de potasse et de soude. Mais les vapeurs par lesquelles se fait l'échauffement de ces eaux contiennent une certaine proportion d'acide chlorhydrique et de gaz sulfureux. Ces acides tendent à s'emparer des alcalis pour les transformer en sulfates et en chlorures. Bientôt la silice des silicates n'est plus assez énergiquement retenue en combinaison et l'excès se dépose au fur et à mesure sous la forme hydratée.

Comme tous les phénomènes que nous avons étudiés, l'action des geysers est loin d'être permanente. A plusieurs années de distance, on remarque une diminution sensible dans son intensité. Les éruptions du Grand Geysers d'Islande n'ont plus la régularité qui les avait rendues classiques, et celles du Yellowstone, observées pour la première fois en 1872, offrent déjà des symptômes de décroissance. Là, comme partout, le temps, loin d'accentuer l'effet des forces naturelles, met plutôt en évidence cette tendance générale au repos, que nous avons tant de fois signalée.

Geysers calcaires. Travertins. — Si le phénomène physique des geysers est indépendant de la nature du terrain traversé par les émanations, il n'en est pas de même du phénomène chimique. Lorsque la roche encaissante est un calcaire, c'est du carbonate de chaux que les eaux lui enlèvent, à la faveur de l'acide carbonique, et qu'elles vont déposer ensuite à leurs points d'émergence. Ainsi se forment, sur les bords du Yellowstone, de vrais *geysers calcaires*.

Dans la même famille, mais avec une moindre violence des émissions, doivent être rangées ces sources chaudes, en relation évidente avec l'action volcanique, qui, en déposant à l'air, surtout dans les cascades, le calcaire dont elles étaient chargées, donnent naissance à des dépôts concrétionnés de tuf dit *travertin*. Les travertins les plus connus sont ceux de Tivoli, en Italie, ceux des anciens bains d'Hierapolis, près de Smyrne (fig. 19), enfin les dépôts formés à Clermont-Ferrand par la fontaine incrustante de Saint-Alyre, dernier écho d'une activité volcanique depuis longtemps endormie.

Sources thermominérales. — Après avoir passé des volcans aux solfatares, de celles-ci aux jets de vapeur et des ces derniers aux sources bouillantes, descendons encore d'un degré sous le rapport de l'énergie des émissions. Nous arriverons à une catégorie de dégagements, dont la liaison avec le volcanisme pourrait facilement échapper, si toute une série de types intermédiaires n'établissait une chaîne continue entre les deux ordres

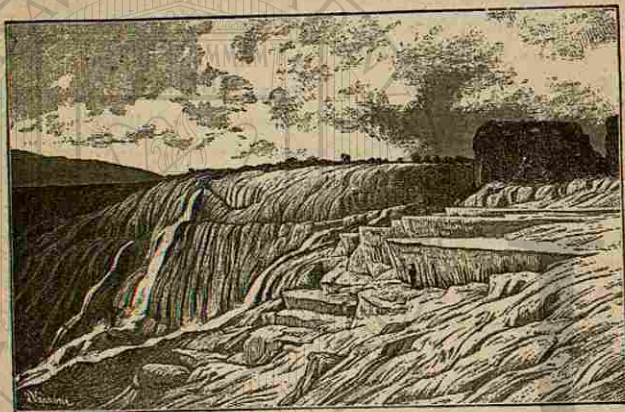


Fig. 19. — Les terrasses calcaires de travertin d'Hierapolis.

de faits. Nous voulons parler des *sources thermales* ou *thermominales*, qui sortent en divers points, parfois avec une pression notable et une température assez élevée, entraînant en dissolution certains principes actifs, tels que des chlorures et des sulfates.

Toutes ces sources se font jour par des *fentes* bien déterminées de l'écorce et ne se trouvent que dans les régions particulièrement disloquées, où elles forment souvent des groupes alignés. Si quelques-unes, comme celles de Plombières, sont assez éloignées de tout centre volcanique, même éteint, d'autres, telles que les sources de Vichy, de Royat, du Mont-Dore, de la Bourboule, etc., se relie sans doute possible à l'ancienne activité éruptive du Plateau Central de la France. Enfin il est des cas, comme au *Sulphur Bank* de Californie, où l'on peut s'assurer que les dégagements thermominéraux représentent l'état actuel

d'une ancienne solfatare. En ce point, au-dessous d'une coulée de lave en partie décomposée, que recouvre une couche de soufre natif, on voit, dans la profondeur, les fissures du terrain parcourues par des *eaux chaudes ascendantes*, qui contiennent une forte proportion de *sulfures alcalins*, avec un excès d'acide carbonique et d'hydrogène sulfuré. Ces eaux déposent du *cinabre*, c'est-à-dire du sulfure de mercure, ainsi que de la silice. Une certaine quantité d'*huile minérale* n'y fait jamais défaut.

Ces observations présentent une extrême importance, en permettant de prendre, en quelque sorte, *sur le fait*, la formation des minéraux métalliques sulfurés, au sein d'un milieu *réducteur* (puisque les hydrocarbures s'y rencontrent). On voit que ces minéraux émanent d'un foyer profond, certainement volcanique dans l'origine, et qu'ils arrivent à la faveur de dissolutions, attaquant leurs canaux d'ascension pour y déposer plus haut, quand la pression et la température sont moindres, avec les sulfures métalliques, les *gangues*, telles que la silice, qui proviennent de la décomposition du terrain traversé.

Salses. Mofettes. — Toutes les émanations dont nous avons parlé jusqu'ici sont chaudes et ne contiennent guère que des substances oxydées. Celles qu'il nous reste à mentionner sont plutôt froides (quoique souvent à une température supérieure à celle du terrain encaissant) et caractérisées par la présence constante des hydrocarbures gazeux ou liquides.

Le type en est fourni par les *Salses* ou *volcans de boue*, petites éminences cratériformes, d'où s'échappe, parfois avec projections violentes, une *boue salée*, traversée par des bulles de gaz hydrocarbonés. Certaines salses, comme celles de Bakou, sur la Caspienne, donnent lieu à une abondante récolte de pétrole. D'autres fournissent des jets de gaz susceptibles de s'enflammer à l'air, en formant des *fontaines ardentes* ou *terrains ardents*. La mer Morte paraît être une ancienne salse, où les dégagements d'hydrocarbures se font jour encore à l'état de *bitume*.

D'autres émanations froides, caractéristiques des régions où l'activité volcanique est depuis longtemps éteinte, comme l'Eifel et les bords du Rhin, sont les *Mofettes* ou exhalaisons d'acide carbonique. On en compte plus de mille dans la région rhénane,

et, quand le gaz se dégage dans l'eau, il en résulte des sources d'eau gazeuse comme celle de Selters.

On peut penser que les mofettes sont le produit de l'action oxydante de l'air sur des émanations d'hydrocarbures, ce qui les rattacherait étroitement aux salses en faisant, des unes et des autres, le dernier terme de la décroissance des manifestations éruptives.

GÉOTHERMIQUE. THÉORIE DES PHÉNOMÈNES ÉRUPTIFS

Définition de la géothermique. — Les actions internes que nous avons étudiées offrent ce caractère commun, qu'elles s'exercent en des points bien déterminés de l'écorce terrestre. Sans doute elles ont toutes pour principe l'énergie calorifique intérieure; mais rien ne nous autorise encore à faire dériver cette énergie d'un foyer unique et l'on pourrait, à la rigueur, imaginer qu'il existe, dans le globe supposé solide, autant de cavités distinctes, remplies de matières fluides à haute température, qu'il y a de centres d'activité volcanique ou thermale.

Pour déterminer laquelle des deux hypothèses doit être préférée, il importe de rechercher s'il ne se passe pas, dans l'écorce terrestre, quelque phénomène absolument général, propre à démontrer la continuité de la source de chaleur. C'est ce que nous allons vérifier en dirigeant notre attention vers un nouvel ordre de faits, dont l'étude forme, sous le nom de *Géothermique*, un des chapitres les plus intéressants de la science du globe.

Propagation de la chaleur dans le sol. Zone à température invariable. — Nous avons vu plus haut quel ensemble de conditions réglait, en chaque point, la température de l'air au-dessus de la terre ferme. Cette température, que partage la couche superficielle du sol en contact immédiat avec l'atmosphère, varie à tout instant, en raison de la hauteur du soleil et du jeu des saisons. Mais, pour peu qu'on s'enfonce dans le sous-sol, les variations de la chaleur sont lentes à se propager; les roches, meubles ou compactes, ayant en général une très

faible conductibilité calorifique. Ainsi, à Paris, l'influence d'un changement survenu dans la température de l'air ne devient sensible qu'au bout de *trente-huit jours* à travers une tranche de sol de *un mètre* d'épaisseur.

Il suit de là qu'à une certaine profondeur, variable en chaque lieu avec l'amplitude des oscillations annuelles de la colonne thermométrique, il existe une zone où les variations de la température ne peuvent plus se faire sentir et où, par conséquent, le thermomètre doit demeurer immobile, accusant toujours la *moyenne annuelle de l'air* au lieu correspondant. Cette invariabilité est réalisée à Paris pour une profondeur de 40 mètres, et c'est ainsi que, dans les caves de l'Observatoire, le thermomètre centigrade se tient constamment à 10°,8 au-dessus de zéro, moyenne de la température pour l'atmosphère parisienne depuis le moment où l'on a commencé à l'observer régulièrement. Sous l'équateur, où les saisons sont à peine marquées, la couche de température constante se rencontre à peu près à 1 mètre de profondeur. Mais plus on remonte vers les cercles polaires et plus il faut l'aller chercher loin de la surface.

Augmentation de la chaleur avec la profondeur. — S'il n'existait aucune source de chaleur à l'intérieur du globe, la température, à partir de la couche invariable, devrait être constante jusqu'au centre. Il n'en est pas ainsi, et l'expérience des mineurs a depuis longtemps établi que plus on descend, plus la température s'élève, dans des proportions que ni la combustion des lampes, ni la respiration des ouvriers, ni les réactions chimiques admissibles ne sauraient expliquer. Ce résultat est absolument général. Il n'est pas une excavation profonde qui n'en fournisse la démonstration, non seulement près des volcans, mais à des milliers de kilomètres de tout centre éruptif. Le fait se vérifie jusque sous le sol glacé des plaines de la Sibérie, dans les environs d'Iakoutsk, dont la moyenne annuelle est de 10° *au-dessous de zéro*, et où les puits finissent par rencontrer, à 125 mètres de la surface, une zone qui permet l'existence de l'eau à l'état liquide. L'eau des puits artésiens de Paris jaillit, d'une profondeur de 600 mètres, avec une température de 28 degrés centigrades et, pendant le percement du souterrain du Saint-Gothard, le thermomètre, qui

marquait 40 degrés aux extrémités, montait au milieu, sous une épaisseur de 1700 mètres de terrain, à 30°,8, tandis qu'au mont Cenis, sous une verticale de 1600 mètres il avait atteint 30°,1.

Degré géothermique. — Le fait de l'augmentation de la chaleur avec la profondeur étant ainsi universellement constaté, il reste à voir à quelles règles obéit cet accroissement.

Si l'on appelle *degré géothermique* la distance verticale qu'il faut parcourir pour que le thermomètre monte de 1 degré centigrade, on trouve, à la suite d'un premier examen des résultats fournis par un grand nombre de mines, que la valeur de ce degré varie d'une mine à une autre et qu'elle oscille depuis un minimum de 16 mètres jusqu'à un maximum de 118 mètres, la moyenne se tenant habituellement entre 42 et 55 mètres. D'autre part, les sondages artésiens, pour des profondeurs atteignant 600 mètres, donnent des résultats à la fois plus faibles et beaucoup plus concordants, presque toujours compris entre 30 et 32 mètres.

De telles différences n'ont rien qui puisse étonner. En effet, le mode de propagation de la chaleur dans l'écorce terrestre doit varier avec la nature et la porosité des roches, avec l'inclinaison des couches et leur état de dislocation, qui permet tantôt la descente des eaux froides de la surface, tantôt l'accès des eaux ou des vapeurs chaudes venant de l'intérieur. Il n'y a donc pas lieu de s'arrêter à ces variations de détail, dont l'importance s'efface absolument devant le résultat des expériences décisives exécutées, avec toutes les précautions convenables, à l'occasion des deux sondages les plus profonds qui aient encore été entrepris. Nous voulons parler du sondage de Spreenberg, près de Berlin, poussé à 1267 mètres de la surface, et de celui de Schladebach, non loin de Leipzig, dont la profondeur a dépassé 1700 mètres.

Le premier a donné une température au fond de 48°,1 et, dans le second, à 1656 mètres, le thermomètre s'est tenu à 55 degrés centigrades.

Il est donc permis de dire que, aussi loin qu'on soit descendu, *la température ne cesse de croître régulièrement*. En outre, le taux moyen de cet accroissement, lorsqu'on part d'une

altitude voisine du niveau de la mer, s'exprime par un degré géothermique compris entre 32 et 37 mètres.

Hypothèse du noyau igné. — Or il ne s'agit plus ici d'un échauffement local, qu'il soit loisible de rapporter à une cause accidentelle. C'est toute l'écorce terrestre qui se montre ainsi le siège d'un *échange incessant et régulier de chaleur entre les couches profondes et les couches extérieures*. Les données expérimentales que nous venons d'enregistrer nous autoriseraient, à la rigueur, à calculer la profondeur pour laquelle la température atteindrait le degré nécessaire à la fusion de toutes les roches, et nous trouverions que cette profondeur n'est vraisemblablement qu'une très petite fraction du rayon terrestre. Mais cela même n'est pas nécessaire. Il nous suffira de constater que l'échange observé nécessite l'existence d'un noyau à température élevée et que la provision de chaleur de ce noyau doit être telle qu'elle puisse lutter avec efficacité contre le refroidissement de l'espace, alors que la chaleur solaire, réduite à ses seules forces, ne pourrait entretenir à la surface du globe qu'une température *moyenne* d'une *quinzaine* de degrés. De plus, comme cette source interne, d'après ce que nous savons de l'ancienneté de l'écorce, doit suffire à sa tâche depuis un nombre incalculable de siècles, le bon sens commande de la chercher dans un vaste réservoir de matières, à très haute température, que l'écorce solide défend contre le rayonnement, absolument comme la croûte scoriacée d'une coulée de lave lui permet quelquefois de garder sa chaleur pendant des années.

Ce réservoir représenterait le reste de l'énergie calorifique, emmagasinée à l'origine dans la masse brillante de notre planète, alors que, selon la belle conception de Laplace, elle venait de se détacher de la nébuleuse solaire, avec laquelle jusqu'alors elle avait été confondue. On pourrait le considérer comme un bain de matières métalliques, où dominerait le fer, et qui tiendrait en dissolution des gaz réducteurs, tels que les composés hydrogénés du soufre et du carbone. Ainsi s'expliquerait la forte densité du globe, égale à plus de trois fois le poids spécifique moyen des matières de l'écorce superficielle, et il serait également permis d'y trouver la justification du

magnétisme de notre planète. Ajoutons que les météorites, qui sont considérées comme des fragments de matière planétaire, se montrent riches en fer, natif ou combiné au soufre, au phosphore, même au carbone; enfin que les comètes laissent reconnaître au spectroscope la flamme des hydrocarbures, ce qui, par analogie, semble justifier l'hypothèse qui vient d'être exposée relativement à la constitution du noyau.

Explication des phénomènes volcaniques. — Si l'on adopte cette manière de voir, rien n'est plus simple que l'explication qu'on en tire pour les phénomènes volcaniques. On se représente sans peine, sous la croûte solide, la masse ignée, qui peut-être est pratiquement solide à cause de la pression qu'elle supporte, mais qui reste capable de reprendre l'état liquide si la pression vient à diminuer. Dans ce cas, la masse ignée devient le siège de réactions incessantes, et notamment de dégagements gazeux, qui doivent la faire monter à travers les fissures de l'enveloppe et l'amener au jour dans les parties disloquées, lesquelles correspondent aux rides de l'écorce les mieux accentuées, et coïncident pour ce motif avec les rivages maritimes. Ainsi se détachent du réservoir commun, pour cheminer, désormais isolées, dans les sillons intérieurs de la croûte, des colonnes liquides destinées à s'épancher sous la forme de laves, et cela d'autant plus aisément que les fissures demeureront mieux ouvertes. De temps en temps, les gaz emprisonnés dans ces nappes atteignent une tension suffisante pour provoquer de violentes explosions: d'autres fois, au contraire, comme aux îles Sandwich, les matières sont assez fluides pour que les cheminées ne s'obstruent pas, et alors l'ascension de la lave est continue et exempte de phénomènes explosifs.

On a pensé plus d'une fois que l'intervention de la mer était nécessaire pour expliquer les paroxysmes, dont chacun résulterait d'une vaporisation subite des eaux marines, arrivant par quelques fissures au contact de la masse ignée. Mais il semble qu'on puisse aisément se passer de cette hypothèse. Nombre de volcans, parmi les plus actifs, sont éloignés de la mer de plus de *deux cents kilomètres*, et l'on se figure mal les eaux océaniques parcourant une telle distance, à travers des canaux étroits et sinueux, en quantités suffisantes pour provoquer une

explosion. Quand, de plus, aux îles Sandwich, on voit la lave bouillante se maintenir constamment à une grande hauteur, dans un massif entièrement volcanique, situé en plein océan et où les preuves abondent d'une facile communication avec la mer, *sans que jamais il se produise une seule explosion*, il doit paraître évident que l'ascension des laves n'a pas besoin du secours des eaux marines. La provision des gaz dissous dans le réservoir interne suffit à expliquer les violents dégagements de vapeurs qui accompagnent certaines éruptions, d'autant mieux que l'expérience des laboratoires, par exemple celle du *rochage* qui se produit dans la coupellation de l'argent, montre que les gaz retenus par un métal en fusion tendent à se dégager par saccades, au moment où une première croûte est déjà formée.

Réponse à quelques objections. — On a soutenu plus d'une fois, au nom des mathématiques, l'impossibilité de l'existence d'un noyau liquide à l'intérieur de notre planète. Tantôt on s'est fondé sur certaines données astronomiques, dont la valeur serait différente, affirmait-on, si le globe était en majeure partie liquide. Tantôt on a invoqué l'aplatissement terrestre, trop considérable, au dire de quelques-uns, pour l'hypothèse en question. Tous ces calculs sont obligés d'accepter, pour point de départ, des données numériques établies par des expériences de laboratoire et dont il est illégitime d'étendre la signification à une masse telle que notre terre. Parmi ces données, les unes s'appliquent à des liquides parfaits, qui ne peuvent rien avoir de commun avec le mélange de métaux et de gaz dont se composerait le noyau; les autres concernent des solides plus ou moins homogènes et élastiques, auxquels la croûte terrestre n'est en rien comparable. Aussi pensons-nous que ces objections théoriques (dont quelques-unes ont déjà dû être abandonnées par leurs auteurs) ne sauraient prévaloir contre le témoignage de tant de faits, en faveur de l'existence d'une source d'où dérivent les énergies calorifiques internes. Elles perdent d'ailleurs toute leur force, si l'on admet que la pression imprime aux matières ignées, malgré leur température, un état *pratiquement* équivalent à la solidité.

§ 4

MOUVEMENTS DE L'ÉCORCE TERRESTRE.

Conséquences de la chaleur interne. — Si l'écorce terrestre n'est qu'une enveloppe, entourant une masse ignée qui, de temps en temps, s'épanche au dehors, il est impossible que la position de la croûte soit stable. Des affaissements doivent se produire, formant la contre-partie de la sortie des laves. De plus, le noyau doit se refroidir et se contracter peu à peu, faisant naître, dans l'écorce devenue trop large, une tendance au *ridement* qui se manifestera, sur certains points, par la formation de bourrelets et de fissures, sur d'autres par des effondrements.

Toutefois, si la structure du globe atteste, comme nous le verrons plus tard, que des mouvements de ce genre se sont souvent répétés à travers les âges, nous ne devons pas nous attendre d'une manière absolue à trouver, parmi les phénomènes actuels, la vérification de ces inductions. En effet, la déperdition de la chaleur interne, au point où elle est aujourd'hui parvenue, marche avec assez de lenteur pour ne produire des effets appréciables qu'au bout d'un temps très long. De plus, la terre ayant 310 millions de kilomètres carrés de surface, un affaissement général de *un millimètre*, totalement insensible par lui-même, suffirait à contre-balancer la sortie de 310 *kilomètres cubes* de laves, quantité comparable à tout ce qui a pu être rejeté par les volcans depuis les temps historiques.

Dès lors il est logique d'admettre que nous traversons une de ces périodes d'équilibre, où l'écorce ne peut être affectée que de mouvements insignifiants. Sous cette réserve, nous allons passer en revue les phénomènes de ce genre qui peuvent s'offrir à l'observation.

Tremblements de terre. — En divers points du globe, la croûte solide se montre plus ou moins fréquemment agitée de frémissements, en général très courts, caractérisés par l'état de trépidation du sol et que, pour ce motif, on nomme *tremblements de terre*. Ces mouvements se traduisent, à la surface,

quelquefois par des ondulations, plus souvent par des *secousses*, parfois assez fortes pour entraîner la ruine des édifices et le crevassement du sol, bien que leur durée puisse ne pas dépasser quelques secondes.

Les plus grandes catastrophes de ce genre que l'histoire de l'Europe ait enregistrées sont celles de 526, où 120 000 personnes au moins périrent sur le littoral méditerranéen, et de 1693, où un tremblement de terre, survenu en Sicile, coûta la vie à 60 000 habitants. Les secousses qui détruisirent Lisbonne en 1753 firent 30 000 victimes. A Casamicciola, dans l'île d'Ischia, le 28 juillet 1883, dix secondes suffirent pour amener la destruction de 1200 maisons et causer la mort de plus de 2300 personnes.

Dislocations du sol causées par les phénomènes volcaniques. — Assez souvent, notamment en Calabre, des crevasses béantes se forment dans le sol à la suite de ces ébranlements;

quelquefois aussi une portion de terrain se soulève ou s'abaisse d'une manière durable. C'est ainsi qu'en Italie, près de Pouzzoles, le sol du temple de Sérapis, construit par Marc-Aurèle, a subi, sans doute lors de l'éruption de 4198, un affaissement local, par suite duquel les colonnes se sont trouvées immergées au moins sur 6 m. 50. Pendant plus de 300 ans cette immersion a persisté, peut-être avec quelques oscillations, si bien que les mollusques *lithophages*, ceux qui vivent à la surface de l'eau, en pratiquant des logements dans les roches du rivage, ont pu cribler le fût des colonnes, sur 3 mètres de hauteur, de leurs incisions caractéristiques (fig. 20). Puis le sol s'est relevé et aujourd'hui le pavé du temple est seul baigné par l'eau. Plusieurs faits du même genre, mais toujours localisés, ont été signalés sur la côte du Chili ainsi que dans l'Inde.

Seulement il n'est pas du tout prouvé que les déplacements

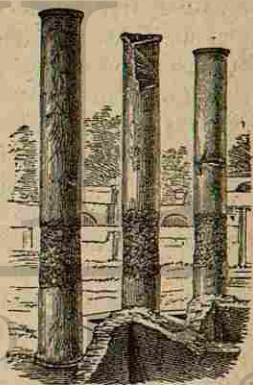


Fig. 20. — Les colonnes du temple de Sérapis.

verticaux alternatifs, comme celui dont les colonnes de Pouzoles portent la trace, soient le résultat de phénomènes mécaniques brusques. Il est fort possible que des nappes de lave, injectées souterrainement dans les profondeurs du terrain, subissent dans leur volume des variations qui doivent déterminer, tantôt le soulèvement en masse, tantôt l'affaissement du sol qu'elles supportent.

Propagation des secousses. — Divers systèmes ont été imaginés en vue de déterminer le mode de propagation des secousses ou *mouvements sismiques*, et l'on est arrivé à dresser, pour chaque tremblement de terre, des cartes qui rendent sensible aux yeux le développement progressif du phénomène. Le résultat de ces constatations a été de montrer que les tremblements de terre sont des vibrations du sol, déterminées par un ébranlement initial survenu au-dessous de la surface et se propageant comme tous les mouvements vibratoires, c'est-à-dire avec une vitesse influencée par la nature des terrains et leur état de dislocation. En arrivant à la mer, la vibration s'y transmet suivant les lois ordinaires de l'ébranlement des liquides, et une vague immense, dite *vague de translation*, se propage à travers toute la masse océanique. Sa vitesse, variable avec la profondeur d'eau, oscille entre 150 et 300 mètres par seconde dans le Pacifique; tandis que, sur la terre ferme, la vitesse de propagation des vibrations ou *ondes sismiques* peut atteindre 800 mètres, les solides transmettant les ébranlements beaucoup mieux que ne font les liquides.

Recherche des causes des tremblements de terre. — Il reste maintenant à déterminer la cause de ces ébranlements. Pour y arriver, nous commencerons par laisser de côté tous ceux qui peuvent s'expliquer par des circonstances purement locales; par exemple les tremblements de terre produits, dans les pays accidentés, comme la Suisse, par le changement d'assiette de certains massifs de terrain, quand les infiltrations ont délayé ou dissous les couches (argile, sel, gypse, etc.) qui leur servaient de support. Nous négligerons également les désordres occasionnés, dans le voisinage immédiat des volcans, par la violence des éruptions, désordres dont la cause est suffisamment visible.

Cela posé, les grands tremblements de terre, ceux qui affectent des étendues de pays considérables, se montrent souvent tout à fait indépendants de l'action volcanique, tandis que leur mode de propagation est lié aux accidents principaux du relief, tels que les montagnes et les lignes de dislocation. Aussi plus d'une fois a-t-il paru naturel de les considérer comme l'indice de mouvements généraux du sol, déterminés par le défaut d'équilibre de la croûte, de telle sorte qu'il y faudrait voir les phénomènes précurseurs des mouvements *orogéniques*, c'est-à-dire de ceux qui sont destinés à se résoudre dans la formation de chaînes de montagnes.

Faible profondeur des centres d'ébranlement. Nature des secousses et des bruits souterrains. — Nous devons reconnaître cependant que, jusqu'ici, l'observation n'a fourni aucune preuve en faveur de cette manière de voir. Nulle part, à la suite d'un grand phénomène sismique, on n'a constaté de modifications survenues dans l'altitude des points de la surface.

En outre, toutes les fois que, par l'étude de la direction et de l'inclinaison des crevasses, on a pu se faire une idée de la profondeur à laquelle avait dû se produire l'ébranlement initial, on a trouvé, d'une part, que ce premier centre de vibration semblait se réduire à un point (ou du moins à un espace très circonscrit), d'autre part, que sa profondeur variait habituellement entre 5 et 20 kilomètres, sans dépasser jamais le chiffre de 48. En d'autres termes, l'impulsion initiale partirait toujours d'un centre unique, situé à une distance de la surface très inférieure à celle où il faudrait descendre pour atteindre la nappe ignée interne. Enfin en étudiant, à l'aide d'appareils appropriés, le mécanisme des secousses et la nature des bruits qui les accompagnent, on a toujours été frappé de la très grande analogie de ces phénomènes avec ceux qui caractérisent les explosions.

Conclusion. — En résumé, l'hypothèse qui concorde le mieux avec les faits observés consisterait à regarder les tremblements de terre comme des vibrations occasionnées, dans l'écorce terrestre, par des explosions intérieures. On peut penser que les gaz émanés du noyau igné, ou du moins des parties de ce noyau qui montent dans les sillons intérieurs de

l'écorce, parviennent, en certains points, à s'échapper dans des fissures, sans pouvoir arriver jusqu'à la surface, de telle sorte que leur force vive achève de se dépenser dans un violent effort contre les parties superficielles de l'écorce, qu'ils n'ont pas réussi à traverser. On comprend de cette façon que les phénomènes sismiques soient surtout fréquents dans les pays de montagnes, c'est-à-dire dans les régions disloquées, où abondent les fentes, tandis que les grandes dépressions et les pays de plaines, comme la Russie et l'Allemagne du Nord, en sont habituellement exempts.

Déplacement des lignes de rivage. — Si l'expérience directe est ainsi muette, jusqu'à présent, à l'égard des mouvements orogéniques brusques, ne peut-on du moins constater de lentes oscillations de l'écorce? Il est certain que, sur plus d'un point, les rivages maritimes subissent des changements, que ces variations ont un caractère local, qu'elles se produisent sans régularité et que les symptômes d'émersion semblent quelquefois alterner, sur une même côte, avec ceux de submersion. Dès lors, au lieu de faire intervenir des changements de niveau de la nappe océanique, qui paraîtraient devoir se produire partout dans le même sens, n'est-il pas naturel d'y voir la preuve de mouvements partiels de l'écorce, se traduisant, grâce à l'invariabilité du niveau de l'océan, par des déplacements en sens contraires dans les lignes de rivages?

Ainsi l'on admet assez généralement que le sol des Pays-Bas s'affaisse et qu'en Scandinavie une sorte de mouvement de bascule se produit, par suite duquel le fond du golfe de Bothnie se relève, tandis que la partie méridionale de la Suède tend à se laisser envahir par les eaux.

Interprétation des faits observés. — Toutefois la signification des faits observés n'est pas toujours aussi nette qu'on pourrait le croire après un premier examen. Dans les contrées comme la Hollande, que de grands fleuves ont anciennement conquises sur la mer, le tassement naturel du sol suffit à expliquer l'affaissement qu'on y remarque. Le régime des courants marins peut d'ailleurs changer, ainsi que la violence des vagues, pour des causes encore mal connues, et rendre périlleuse la situation de côtes auparavant moins exposées aux

assauts de l'océan. De cette manière, l'invasion relativement récente de la mer dans la baie du mont Saint-Michel, par exemple, pourrait se justifier par un progrès constant de la force des grandes marées, sans que le sol se fût réellement affaissé. D'autre part, certaines conquêtes de la terre ferme, comme celles qui ont eu lieu depuis quelques siècles sur le littoral charentais, sont simplement le résultat du progrès des alluvions apportées par les fleuves.

Enfin le niveau de la mer est sujet lui-même à des variations d'une certaine amplitude. Tantôt les glaces polaires, en fondant, diminuent la salure et, par suite, la densité de l'eau marine avoisinante, et celle-ci, pour continuer à faire équilibre aux eaux plus salées des latitudes inférieures, est forcée d'élever son niveau d'une quantité correspondante. Tantôt les glaces continentales, par l'excès de masse qu'elles apportent sur les régions où elles viennent s'accumuler, peuvent augmenter, en vertu des lois de la gravité, l'attraction locale de ces dernières sur les océans voisins, dont elles relèvent les bords d'une manière appréciable, et dans une proportion qui varie avec l'épaisseur des neiges et des glaces. Tantôt enfin une mer intérieure, comme la Caspienne ou la Baltique, subit, par suite de l'inégalité de l'apport des fleuves, des variations de niveau qu'on imputerait bien à tort à un mouvement du sol.

Ces considérations, en partie nouvelles, exigent qu'on apporte désormais une grande prudence dans l'interprétation des *mouvements relatifs* de la terre ferme et de l'océan. Nous ne nions pas qu'il puisse se produire, à l'heure qu'il est, des mouvements lents dans l'écorce, par exemple par suite de la dilatation en masse d'une région qui, longtemps couverte par les glaces et ainsi maintenue à une température constante, se trouve, après la disparition de son manteau glaciaire, exposée de nouveau au rayonnement dans l'espace. Mais ce n'est pas là, suivant nous, qu'il convient de chercher la cause des changements, beaucoup plus brusques et plus tranchés, que le relief du globe a subis aux diverses époques géologiques. Nous vivons actuellement dans une phase d'équilibre, et l'homme ne paraît avoir été jusqu'ici le témoin d'aucun de ces mouvements accentués par lesquels la géographie terrestre a été tant de fois affectée.

LIVRE DEUXIÈME

GÉOLOGIE

PROPREMENT DITE

OU

HISTOIRE ANCIENNE DU GLOBE

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉCORCE
TERRESTRE

§ 1

COMPOSITION GÉNÉRALE DE L'ÉCORCE

Formations stratifiées. Formations massives. — Toutes les fois que, par des travaux de carrières, de chemins de fer ou de mines, on vient à entamer l'écorce terrestre sur une certaine étendue, on constate que les matériaux ou *roches* dont elle est composée se groupent, par leur nature et leur distribution, autour de deux types principaux.

Les uns sont des *roches détritiques*, incontestablement formées de débris juxtaposés et se succédant les unes aux autres, de haut en bas, sous la forme de couches parallèles, exactement comme les *dépôts sédimentaires* de nos plages. Ce sont les *formations stratifiées*, qu'on a pu également qualifier de *terrains neptuniens*, parce que la plus grande partie s'est déposée dans la mer. Les autres consistent en *roches massives*, à éléments parfois vitreux, beaucoup plus souvent cristallisés et dont

l'arrangement, qui ne trahit en rien l'action de la pesanteur, accuse au contraire la prise en masse d'une matière primitivement fluide ou visqueuse. Leur analogie avec les laves volcaniques est évidente, d'autant mieux que, quand le contact des deux catégories de roches peut être observé, on voit souvent celles de la seconde pénétrer à travers les dépôts stratifiés en veines ou en filons, absolument comme les laves modernes sont parfois injectées au milieu des terrains avoisinants. Il est donc légitime de considérer ces roches massives comme des *formations éruptives* ou *plutoniques*.

Exemples de formations stratifiées. — Un très bon exemple de terrains stratifiés s'observe à l'embouchure de la Seine, au cap de la Hève. La base de la falaise est formée (fig. 21) par

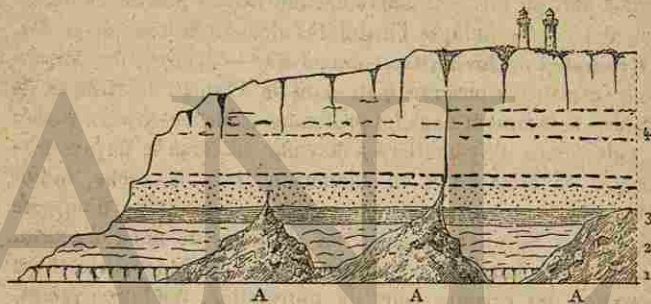


Fig. 21. — Falaise de la Hève. — 1, calcaires marneux; 2, sables; 3, argile; 4, craie; A, éboulis.

quelques mètres de *calcaires marneux* et d'*argiles bleuâtres*, supportant, par l'intermédiaire d'une sorte de *gravier ferrugineux*, une assise de 25 mètres de *sables jaunes* avec taches de rouille. Sur ces sables repose un lit noir d'une argile imperméable, qui sert de support à une assise de *marne sableuse verdâtre*, fortement aquifère. Enfin toute la partie supérieure de la falaise est occupée par une couche de *craie*, grise en bas, plus blanche en haut, dont la stratification s'accuse par plusieurs cordons horizontaux de silex noirs ou gris. Ainsi sur ce point du globe, comme sur une infinité d'autres, la succession des dépôts sédimentaires atteste, dans le passé, les fréquentes

variations du régime de la mer qui a longtemps occupé ces parages.

Une coupe non moins instructive est celle des grandes plâtrières d'Orgemont, près d'Argenteuil. Là, une masse puissante de *gypse* ou pierre à plâtre, avec ossements de mammifères, de temps en temps interrompue par des lits horizontaux de marnes jaunes à fossiles marins, supporte des marnes grises, puis blanches, où l'on ne trouve que des espèces d'eau douce. Bientôt les indices marins reviennent avec une assise de glaises, dont la couleur, d'un vert franc, est encore accentuée par des cordons réguliers de rognons blancs. Puis viennent des marnes argileuses remplies d'huîtres, auxquelles succèdent des sables jaunés. Ici donc la mer et la terre ferme ont été tour à tour en lutte et, dans chacune de ces phases, la variation des dépôts indique l'instabilité des conditions physiques.

Exemples de formations massives. — L'allure des formations massives s'observe bien dans le Plateau Central de la France, notamment dans les profondes tranchées par lesquelles la voie ferrée d'Eymoutiers à Meymac traverse le noyau granitique de Millevaches en Limousin. Dans la roche, tantôt compacte, tantôt ameublie et transformée en arène d'un rose vif, on voit miroiter au soleil les paillettes de mica argentin, ainsi que les lamelles cristallines rosées du feldspath orthose et parfois les prismes noirs de tourmaline. Quelques veines, mieux cristallisées que le reste, serpentent à travers la masse et celle-ci est recoupée de temps à autre par des filons presque verticaux d'une roche verte compacte, également cristalline, ainsi que par des veines d'une roche pourrie, que des efflorescences jaunâtres font reconnaître pour des têtes d'affleurement de filons à minéraux sulfurés.

Rien, dans ce massif aux formes extérieures remarquablement arrondies, ne trahit une stratification quelconque. Mais à peine est-on entré dans le plateau que domine ce noyau de granite, qu'on voit apparaître des schistes régulièrement feuilletés, au milieu desquels des veines de la roche granitique précédente sont injectées en divers points, tranchant par leur couleur claire et rosée sur la masse sombre des schistes.

Terrains disloqués. — A côté de ces deux types bien nets,

formations sédimentaires en couches horizontales et formations massives à éléments cristallisés, la visite des pays disloqués, comme le Jura (fig. 22), nous en offre un autre, caractérisé par l'inclinaison et le contournement des strates. Là, des couches de calcaires, de marnes, d'argiles, en tout semblables à celles des pays à stratification régulière, se montrent inclinées, ondu-

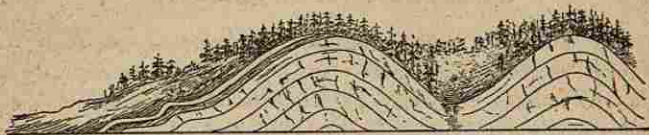


Fig. 22. — Couches plissées dans une cluse du Jura bernois.

lées en de nombreux replis, parfois renversées, fréquemment entrecoupées de cassures.

Il est visible que ce sont là de véritables sédiments, originellement déposés en couches horizontales, mais dérangés plus tard de leur position primitive par les mouvements de l'écorce qui ont donné naissance aux montagnes.

Définition des types de formations. — Ces constatations suffisent pour nous faire reconnaître, dans l'état présent de l'écorce terrestre, le résultat du concours de trois ordres distincts de phénomènes : les *phénomènes sédimentaires*, par le jeu desquels s'est constituée, le long des anciens rivages, sous l'influence combinée de la chaleur solaire et de la pesanteur, une série de couches stratifiées, superposées par rang d'âge; les *phénomènes éruptifs*, dont l'effet a été d'injecter à plusieurs reprises dans l'écorce ou de faire épancher à sa surface des matières fondues, formant par leur consolidation des roches cristallines; enfin les *phénomènes orogéniques* qui, en dérangeant périodiquement l'assiette de la croûte, ont, à diverses reprises, modifié la géographie du globe et ravivé l'activité de la sédimentation.

Pour déterminer lesquels de ces phénomènes sont intervenus dans la formation d'une masse minérale donnée, deux sortes d'observations sont nécessaires : celles qui ont pour objet de définir la nature même de la masse, et celles qui permettent de

dire à quel type de structure générale elle obéit. La *lithologie* ou *pétrographie* répond au premier de ces besoins; la *stratigraphie* satisfait au second.

§ 2

ROCHES MASSIVES OU ÉRUPTIVES

Nécessité de l'étude préalable des roches éruptives. — Toutes les roches stratifiées étant le produit de la désagrégation de masses minérales préexistantes, les diverses variétés qu'on y observe doivent logiquement être étudiées après les roches de première formation qui leur ont donné naissance. Celles-ci appartenaient, ou bien à la primitive écorce, c'est-à-dire à la première croûte qui a dû se former à la surface du globe originairement fluide, ou bien aux roches massives qui, à diverses reprises, se sont fait jour à travers les fissures de l'écorce.

D'ailleurs les roches de la croûte primitive, si tant est qu'on les connaisse avec certitude, ne diffèrent des plus anciennes roches massives que par un arrangement particulier des éléments, qui trahit un caractère mixte et sur lequel nous reviendrons plus loin. Telle est la raison pour laquelle ce court aperçu lithologique débutera par les roches éruptives, les seules dans la formation desquelles aucune force extérieure n'ait agi.

Éléments des roches éruptives. — Toutes les roches éruptives proviennent de la partie superficielle du noyau métallique fluide, dont on peut dire qu'elles ont constitué l'*écume*. Il est naturel que cette écume soit composée des plus légers et en même temps des plus réfractaires parmi les produits de l'oxydation du noyau. C'est pourquoi, de même que, dans l'affinage de la fonte, on voit flotter, à la surface du bain métallique, des *scories* qui résultent de l'union du fer avec la *silice* ou *acide silicique*; de même aussi que, dans la fabrication de la fonte, la partie supérieure du bain est occupée par des *laitiers*, qui ne sont autres que des combinaisons de *silice* avec la *chaux* employée comme fondant, l'oxyde de fer et divers autres produits;

ainsi toutes les roches éruptives sont, en majeure partie, formées de *silicates*, où l'acide silicique, le plus léger et le plus réfractaire des minéraux, est tantôt isolé sous forme de *quartz* (espèce qui, dans son plus grand état de pureté, donne le cristal de roche), tantôt et le plus souvent combiné avec les oxydes des métaux les plus légers. Ceux-ci, *aluminium*, *potassium*, *sodium*, *calcium*, étaient venus les premiers se brûler à l'air en formant des oxydes, *alumine*, *alcalis* (*potasse* et *soude*), *chaux*; et ces oxydes, en s'unissant à la silice, ont donné naissance à des silicates connus sous le nom de *feldspaths*. Ce sont des minéraux massifs, durs, se divisant par le choc en lamelles planes brillantes, à éclat vitreux, et partageant avec le quartz la propriété de rayer le verre. En outre, le *fer* et le *magnésium*, arrivant d'une profondeur un peu plus grande, sont venus se joindre aux substances précédemment énumérées, en donnant naissance à d'autres silicates moins durs, habituellement cristallisés en paillettes très minces, flexibles et élastiques, et qu'on appelle les *micas*.

Enfin, quand la silice s'est unie simplement aux oxydes du fer, du calcium et du magnésium, sans alumine, il en est résulté d'autres silicates plus lourds que les précédents, et en même temps moins riches en silice. Ce sont les *pyroxènes* et les *amphiboles*, minéraux en lamelles fibreuses d'un vert noirâtre, et le *péridot* ou *olivine*, en grains vitreux d'un vert jaunâtre.

Roches acides; roches basiques; roches neutres. — Il y a des roches dans lesquelles une partie de la silice demeure à l'état de liberté, pouvant affecter la forme de *quartz* (silice entièrement cristallisée), celle de *calcédoine* (mélange de quartz et de silice amorphe ou fibreuse), enfin celle d'*opale* (silice gélatineuse, combinée avec de l'eau). A cause de la faible densité de la silice, qui est d'environ 2,6, les roches où cet élément est assez abondant pour qu'une partie demeure libre, sont plus légères que les autres, leur poids spécifique oscillant entre 2,6 et 2,7. En outre, la silice jouant, dans les combinaisons, le rôle d'un acide, les roches où elle est prépondérante peuvent aussi être qualifiées de *roches acides*.

Dans cette catégorie dominant, avec les *micas*, les *feldspaths*, particulièrement riches en potasse et en soude, tels que l'*orthose*

(silicate d'alumine et de potasse), où la proportion de silice peut atteindre 68 p. 100, et l'*oligoclase*, où la soude est associée à un peu de chaux.

On peut dire que, dans les roches acides, il y a l'élément *clair* ou feldspathique, et l'élément *foncé*, ce dernier formé par le mica, qui le plus souvent est *ferro-magnésien*, ou par l'amphibole, à la fois ferro-magnésienne et calcarifère.

Par opposition aux précédentes, les roches qui ne contiennent pas de silice libre, et où, par conséquent, dominent les bases métalliques, sont à la fois *lourdes* et *basiques*. La proportion de silice combinée n'y atteint jamais 50 p. 100. Le poids spécifique va de 2,9 à 3,4. En fait de silicates alumineux, on n'y voit guère que les feldspaths à base de chaux (*labrador*, *anorthite*) et les micas. C'est là surtout que se rencontrent les pyroxènes, les amphiboles et le périclote. La présence de ces minéraux détermine une couleur foncée, ordinairement d'un vert noirâtre, qui contraste avec la teinte habituellement claire des roches acides. De plus, tandis que, dans ces dernières, l'oxyde de fer se présente surtout au degré supérieur d'oxydation, en petits points de *fer oligiste* disséminés au milieu du feldspath auquel ils communiquent une couleur rougeâtre, on voit, dans les roches basiques, de nombreux grains noirs, attirables à l'aimant, de *fer oxydulé magnétique*, parfois même du *fer natif* métallique.

Enfin il existe toute une catégorie de roches qui, sans renfermer de silice en excès, ne contiennent les silicates lourds qu'en petite quantité, de telle façon que leur densité, habituellement variable de 2,7 à 2,9, est intermédiaire entre celle des roches acides et celle des roches franchement basiques. Il est donc convenable de les grouper sous la dénomination de *roches neutres* et de les définir par cette condition, que la teneur en acide silicique y soit comprise entre 50 et 65 p. 100.

Origine probable des diverses catégories. — En résumé, à ne considérer que la *composition chimique* de l'ensemble, il y a trois catégories de roches éruptives : les roches légères ou acides, les roches moyennes ou neutres, les roches lourdes ou basiques. Les unes et les autres proviennent, selon toute apparence, de la *scorification* du noyau métallique interne. En effet,

de même qu'un minerai de fer, traité dans un haut fourneau, sous l'influence d'un énergique courant d'air, se débarrasse, avec l'aide des fondants employés, de ses impuretés, qui viennent former un verre, dit *scorie* ou *laitier*, nageant à la surface de la fonte, de même on conçoit que le noyau métallique, extérieurement soumis à l'action oxydante de l'atmosphère, ait cédé à l'oxygène ses éléments les plus légers, pour en former le fonds de la croûte superficielle. Quant aux différences observées entre les diverses roches éruptives, elles doivent résulter de ce que les matériaux de ces roches appartenaient à des zones inégalement profondes de la périphérie du noyau. Les roches basiques, par leur teinte foncée, leur richesse en fer magnétique et en composés du protoxyde de fer, témoignent que l'oxydation directe a eu peu de part à leur formation. C'est une raison nouvelle d'y voir des produits plus voisins que les autres du noyau métallique, où nous avons lieu de penser que les influences *réductrices* sont prédominantes.

Rôle du silicium et du carbone. — Avant d'aller plus loin, il convient d'arrêter un moment notre attention sur le rôle comparé du silicium et du carbone dans l'écorce terrestre. Ces deux éléments, que les chimistes ont de tout temps classés dans la même famille naturelle et qui, l'un et l'autre, ont la propriété d'affecter trois états distincts, définis par le *charbon* amorphe, le *graphite* et le *diamant*, sont vraisemblablement mélangés, d'une manière intime, avec le fer qui paraît constituer la masse du noyau interne. Mais dès leur arrivée à la surface, ils se séparent en s'oxydant, et tandis que l'un forme la base de l'écume réfractaire qui va devenir l'écorce solide, caractérisée par sa *stabilité* mécanique et chimique, l'autre sera l'aliment essentiel de la vie, dont il favorisera par sa *mobilité* les perpétuelles transformations. Il est intéressant de voir ces deux rôles opposés remplis par deux corps aussi étroitement alliés l'un à l'autre en raison de l'ensemble de leurs propriétés.

Types de texture. — Une matière fluide de composition donnée engendre des roches très différentes, suivant la manière dont se fait sa solidification et suivant la part plus ou moins grande que les *dissolvants* y peuvent prendre. Tantôt la *crystalisation* est complète, comme dans le granite : c'est l'état *grani-*

toïde; tantôt la plus grande partie de la matière demeure *amorphe* à la façon du verre : c'est l'état *vitreux*; tantôt enfin des minéraux nettement cristallisés coexistent avec une pâte amorphe et vitreuse, comme dans les trachytes : c'est l'état *trachytoïde*. Chacun de ces états est lui-même susceptible de variétés,

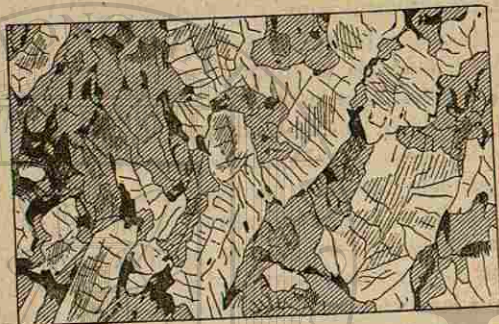


Fig. 23. — Texture granitique (du granite égyptien). — Les surfaces couvertes de hachures fines représentent le quartz; le mica est figuré en noir; le reste correspond au feldspath.

qui se traduisent extérieurement par le *grain* de la roche ou sa *texture*. Ainsi on distingue la texture *granitique* (fig. 23), où tous les éléments, largement et également cristallisés, se

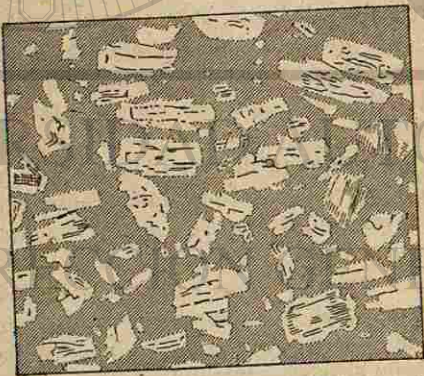


Fig. 24. — Texture porphyrique du porphyre diabasique des Vosges.

voient sans peine à l'œil nu; la texture *porphyrique* (fig. 24), où des cristaux bien développés semblent nager, en quelque

sorte, au sein d'une *pâte* à grain plus ou moins fin; et la texture *compacte*, caractérisée par l'extrême finesse du grain, qui ne devient discernable qu'avec le secours du microscope.

Signification de la texture. Cristallisation intratellurique.

— Le microscope révèle aussi dans les roches porphyriques ou compactes des différences fondamentales, suivant que la pâte, vue sous un grossissement convenable et résout en individus cristallins distincts (fig. 25), ou bien en petits cristaux mal formés et allongés, dits *microlithes* (fig. 26), ou encore laisse voir une quantité plus ou moins

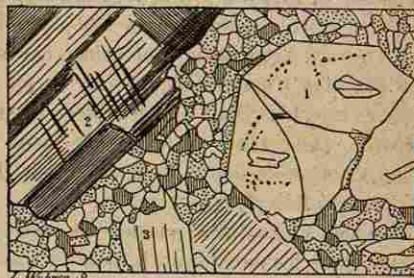


Fig. 25. — Porphyre quartzifère à pâte de microgranulite (granulophyre). — 1, quartz; 2, feldspath oligoclase; 3, mica (grossissement : 80 diamètres).

considérable de matière vitreuse, c'est-à-dire non cristallisée. Or ces différences de texture portent avec elles leur enseignement. Ainsi, dans le *granite*, il est visible qu'il y a eu succession régulière dans la formation des divers éléments minéraux. Le mica s'est séparé le premier. Autour de lui se sont développés les cristaux de feldspath, et enfin la liqueur s'est trouvée ne plus contenir que de la silice, laquelle, sans doute à cause du lent départ des dissolvants qui la maintenaient à l'état liquide, s'est isolée sous forme de quartz. Aussi ce quartz a-t-il dû se mouler, comme une matière plastique, sur les faces déjà



Fig. 26. — Microlithes de feldspath dans la pâte d'une porphyrite.

formées des précédents cristaux, sans pouvoir prendre les formes cristallines qui lui sont propres. Cette série de cristallisations a été, en général, régulière et ininterrompue. Quelque temps qu'elle ait embrassé, elle n'a pas subi de trouble ni d'arrêt. Enfin, chose remarquable, les lois de la chimie y sont

seules intervenues; car, dans le granite, les minéraux les moins fusibles sont précisément ceux qui sont restés le plus longtemps à l'état liquide.

Or l'expérience des laboratoires indique que de telles conditions n'ont pu être réalisées que dans une masse riche en dissolvants et soumise à une pression énergique, en même temps qu'à un refroidissement très lent; et l'observation géologique est d'accord avec cette conclusion, car elle nous apprend que les granites *n'ont jamais dû voir le jour*, et représentent des masses injectées dans les crevasses et surtout dans les plis de l'écorce, sans avoir pu parvenir jusqu'à la surface. Ce sont donc, comme l'a défini M. Rosenbusch, des roches de cristallisation *intratellurique*.

Roches à plusieurs stades de consolidation. — Au contraire, dans les porphyres, la pâte se résout souvent, au microscope, en cristaux *de même nature, mais plus petits*, que ceux qui se détachent à l'œil nu sur cette pâte. Il y a donc eu *deux générations* bien distinctes de la même espèce minérale. Encore la seconde génération est-elle susceptible de deux variétés, l'une où l'on voit des cristaux proprement dits, reconnaissables à la loupe, et l'autre où s'observent des microlithes, c'est-à-dire des individus cristallins imparfaits.

Cette disposition s'explique sans peine, si l'on admet que la masse, après un commencement d'élaboration interne, qui avait donné naissance à de grands cristaux, flottant dans le reste de la matière fluide, ait subi ensuite un refroidissement définitif beaucoup plus brusque, lequel, suivant sa rapidité, aura engendré le premier ou le second type de texture porphyrique. Telle est précisément la condition à laquelle ont été assujetties les roches à pâte microlithique; car ce sont des roches d'*épanchement*, qui ont coulé comme les laves. De la sorte, partiellement formées pendant leur ascension dans la cheminée volcanique, elles ont achevé de se consolider en coulant à l'extérieur. Cette dernière phase, beaucoup plus brusque que la première, parce que la perte de température et le départ des gaz ont été presque immédiats, n'a pas permis, en général, le développement de cristaux bien déterminés; parfois même elle a entraîné la prise de la masse à l'état vitreux.

Ainsi les roches de cette catégorie ont traversé deux *stades* ou *temps de consolidation*: un *stade intratellurique*, auquel se rapportent les grands cristaux des porphyres; et un *stade extratellurique*, variable lui-même selon que les épanchements se sont faits à l'air libre ou sous une nappe d'eau.

La combinaison des divers caractères de texture et de composition engendre un grand nombre de roches éruptives, dont les principales seront seules énumérées ici.

Roches acides. Granite, Granulite, Pegmatite. — Parmi les roches acides, la texture granitique est réalisée au premier



Fig. 27. — Disposition du quartz (partes noires), dans la masse du granite commun.

chef par le *granite*, assemblage homogène de cristaux bien discernables de quartz, de feldspath et de mica, ce dernier minéral pouvant être remplacé par l'amphibole (granite à amphibole des Vosges et de Syène en Égypte). Dans le granite proprement dit, le quartz forme une sorte de trame ou de squelette (fig. 27) à travers toute la roche; tantôt le feldspath est en petits cristaux lamellaires (*granite commun* de la Corrèze, de la Normandie et de la Bretagne, fournissant les dalles de trottoirs employées à Paris), tantôt il est en gros cristaux allongés, blancs ou roses (*granite porphyroïde* du Plateau Central, de Cherbourg et de Laber Ildut, près de Brest).

Dans la *granulite* (fig. 28), le quartz est en grains isolés, parfois même en petits cristaux terminés, et au mica noir ou brun du granite commun s'y ajoute du mica d'un blanc d'argent, souvent prépondérant. Une variété de granulite avec chlorite constitue la *protogine* des Alpes.

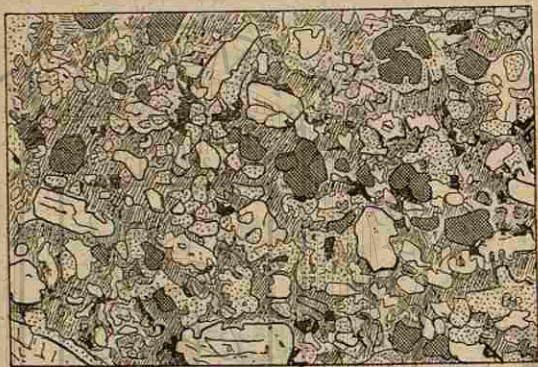


Fig. 28. — Granulite. Les grains de quartz, indiqués par des hachures croisées, et les cristaux de feldspath sont disséminés au milieu d'une pâte composée de grains cristallins de feldspath dominant.

L'isolement du quartz est surtout remarquable dans la *pegmatite*, variété de granulite à très grands cristaux, où le mica blanc se concentre en piles de paillettes hexagonales; en même temps la présence de minéraux riches en fluor et en acide borique, comme la *tourmaline*, sous la forme de prismes noirs cannelés, atteste la puissance des dissolvants sous l'empire desquels a dû s'opérer la consolidation de la masse. Il y a des pegmatites dites *graphiques*, où les cristaux de quartz se détachent en gris, dans les cassures, sur le feldspath blanc ou rose, simulant des caractères hébraïques ou cunéiformes (fig. 29).

Le quartz et le feldspath rayant tous deux le verre, le granite constitue une roche essentiellement dure et d'une grande solidité. Il est susceptible de prendre un beau poli et, dans cet état, la teinte d'un noir verdâtre foncé des lamelles de mica fait un agréable contraste avec la nuance habituellement rou-

geâtre du feldspath et l'éclat vitreux des grains grisâtres de quartz. Cependant, malgré la résistance du granite, l'action prolongée pendant des siècles des agents atmosphériques le désagrège, en fait de l'*arène* ou sable meuble grossier, et change son feldspath en un silicate hydraté d'alumine, analogue au *kaolin* ou terre à porcelaine.

Le granite, manquant de calcaire et gardant toujours un grain appréciable, est peu propre à la culture des céréales. Le



Fig. 29. — Pegmatite graphique.

châtaignier y croît de préférence et les prairies s'établissent aisément à sa surface, où les parties plates forment volontiers des tourbières.

Il arrive quelquefois que, sur les bords d'un massif ou dans des filons, le grain d'une roche granitique (sans doute sous l'influence d'un refroidissement plus brusque) devienne assez fin pour n'être plus discerné qu'à la loupe. Les roches connues sous les noms de *microgranite* et d'*aplite* appartiennent à cette catégorie.

Porphyres et roches acides diverses. — Les roches acides qui ont traversé deux stades de consolidation affectent la texture porphyrique et engendrent d'abord le grand groupe des *porphyres quartzifères*. La pâte, dont les éléments, pour être reconnus, demandent le secours de la loupe, souvent même celui du microscope (auquel cas il faut tailler la roche en lames minces et transparentes), forme un fond rouge, brun, gris ou verdâtre, sur lequel se détachent en clair des cristaux nets de feldspath et des grains vitreux de quartz. Les roches de cette nature, toujours dures et souvent susceptibles d'un beau poli,

forment de nombreuses variétés, qui se présentent surtout en nappes et en filons, tandis que le granite et la granulite sont plutôt en massifs. Aussi est-il très probable que les porphyres sont une manière d'être externe de pâtes éruptives qui, dans la profondeur, auraient engendré des types granitiques.

En général, la pâte des porphyres est une granulite à grain très fin ou *microgranulite*, ce qui pourrait légitimer pour eux le nom de *granophyres*. Même on pourrait les subdiviser en *granitophyres*, *granulophyres* et *pegmatophyres*, suivant que les produits du second stade de consolidation se résoudraient sous le microscope en *microgranite*, *microgranulite* ou *micropegmatite*.

Quand la pâte est compacte et paraît homogène à l'œil nu, on la qualifie de *pétrosiliceuse*. Mais le microscope distingue, dans ces pâtes compactes, celles où la silice en excès s'isole en globules sphériques rayonnés, et celles où elle demeure confusément disséminée dans la masse en éléments très fins, formant

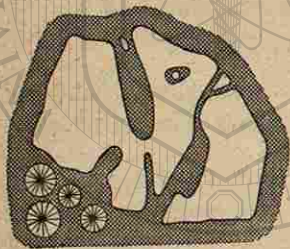


Fig. 30. — Ancien cristal de quartz, brisé et corrodé, dans la pâte d'une rhyolite, avec quelques sphérolithes.

des trainées, ce qui est le cas des vrais *porphyres pétrosiliceux* ou *felsophyres*. Souvent, dans ces derniers, les anciens cristaux de quartz qui se détachent sur la pâte compacte sont brisés et ont leurs bords en partie corrodés, ce qui montre que l'équilibre chimique qui leur avait permis de se développer a été partiellement détruit lors du second temps de consolidation (fig. 30). Fréquemment les menus éléments de la pâte d'un felsophyre sont alignés, attestant que la roche, avant sa consolidation définitive, a subi un écoulement marqué. Cette *texture fluidale* a fait donner le nom de *rhyolites* à un bon nombre de felsophyres modernes.

Il faut encore ajouter à cette énumération les *verres acides* ou *pechsteins*, où toute la pâte est vitreuse, les *pyromérides*, roches parsemées de globules sphériques dits sphérolithes, où des fibres de feldspath sont enchevêtrées avec des séparations de silice libre; enfin la *pièce ponce*, roche acide vitreuse qui, s'étant solidifiée

au milieu d'un abondant dégagement de vapeurs, a pris la texture spongieuse.

Roches neutres. — Les principales roches neutres de la famille granitoïde, c'est-à-dire n'offrant qu'un seul temps bien marqué de consolidation, sont la *syénite*, variété de granite à amphibole dépourvue de quartz, et où les lamelles fibreuses de l'amphibole verte s'enchevêtrent agréablement avec les cristaux feldspathiques au brillant clivage, habituellement rougeâtres; les *minettes*, roches de feldspath et de mica, parmi lesquelles se range le *Kersanton* de Bretagne, espèce foncée, tenace et très résistante, particulièrement propre à la sculpture des édifices.

Les roches neutres, entièrement cristallisées, mais avec deux stades de consolidation, forment la famille des *porphyrites*, porphyres bruns, rougeâtres ou noirâtres, dépourvus de quartz libre, et dont le type est offert par le *porphyre rouge antique*. Les cristaux de la pâte sont allongés et *microlithiques*.

Un grand nombre de roches neutres contiennent des éléments vitreux. C'est à cette catégorie que se rapportent les *trachytes*, roches volcaniques rudes au toucher, comme l'indique leur nom, et qui doivent cette rudesse à un grand nombre de tout petits cristaux pointus de feldspath, ce mode imparfait de cristallisation marquant une tendance vers l'état vitreux (fig. 31). On en observe de beaux types dans les Sept Montagnes, près de Bonn, et une de leurs variétés forme la *domite* du Puy de Dôme. Une autre roche trachytique, mais compacte, se débitant en plaques sonores, est la *phonolite*, usitée pour les toitures au Mont-Dore. Les trachytes les moins riches en silice, abondamment répandus dans la chaîne des Andes ainsi qu'en Auvergne, ont reçu le nom d'*andésites*. Avec le feldspath, on y trouve de l'amphibole et du mica. Enfin il existe des verres naturels neutres, bruns ou noirs, aux-



Fig. 31. — Microlithes de feldspath entourant de plus gros cristaux dans un trachyte (grossissement : 80 diam.).

quels appartiennent diverses variétés d'*obsidienne* et de *ponce*.

Roches basiques. — Les principales roches basiques granitoides sont les anciens *grünsteins* ou roches vertes, c'est-à-dire : la *diorite*, association, agréable à l'œil, de feldspath blanc mat et d'amphibole fibreuse d'un vert noirâtre; la *diabase*, où l'amphibole est remplacée par le pyroxène et qui, avec une texture plus compacte, forme dans les terrains anciens de nombreux filons d'une roche verte très dure, excellente pour l'empierrement (*bizeul* du Cotentin et de la Bretagne); l'*euphotide* de Toscane et le *gabbro*, où le minéral basique est formé surtout de *diallage*, variété de pyroxène en lamelles bronzées; enfin l'*ophite*, roche verte pyrénéenne à *diallage*, feldspath et amphibole, dont la texture est intermédiaire entre l'état granitoïde et l'état trachytoïde.

Le type porphyrique est représenté par le *porphyre vert antique*, où des cristaux, souvent croisés, de labrador, ressortent en blanc verdâtre sur une pâte compacte d'un vert foncé.

La texture compacte, avec éléments vitreux, se montre dans les *mélaphyres* et les *trapps*, mais surtout dans les *basalles*, roches noires dures, à la composition desquelles le périclase et le fer magnétique prennent une part importante, et qui se sont épanchées en grandes coulées régulières. Lorsque ces coulées ont pris l'état solide, le retrait y a fait naître en tous sens des fentes qui ont découpé la masse



Fig. 32. — Colonnade basaltique.

en prismes habituellement à six pans (fig. 32). Ces prismes, isolés et mis en évidence par les érosions, forment les *orgues géologiques* du Puy et du Cantal, les *chaussées des géants* de divers pays, les *colonnades* de la grotte de Staffa, etc.

Aux roches basiques se rattachent étroitement les *serpentines*, formées d'un minéral tendre, silicate de magnésie hydraté, qui paraît résulter de l'altération de masses originaires riches en périclase.

Beaucoup de roches éruptives ont donné naissance à des *tufs*, semblables à ceux des volcans actuels. Le cas est fréquent

pour les *porphyrites*, dont les tufs s'enchevêtrent, en quelque sorte, avec les sédiments terrestres ou marins du même âge. Souvent aussi les coulées de porphyre quartzifère sont accompagnées de tufs, tantôt solides, tantôt argileux comme les *argilolites* du val d'Ajol dans les Vosges. Des tufs plus récents, subordonnés aux épanchements d'andésite et de basalte, s'observent dans le massif du Cantal, où ils contiennent de nombreux fragments anguleux de diverses roches. Les tufs abondent en Sicile et en Islande, où on les désigne sous le nom de tufs *palagonitiques*, à cause de la *palagonite*, silicate fusible et hydraté d'alumine, de fer et de diverses autres bases, qui en est l'élément principal.

§ 3

ROCHES SÉDIMENTAIRES

Principales variétés de sédiments détritiques. — L'étude des phénomènes actuels nous a montré que, parmi les formations sédimentaires, il y avait lieu de distinguer les dépôts *détritiques* (appelés aussi *clastiques* ou fragmentaires), provenant de la destruction mécanique de roches préexistantes, et les dépôts d'origine *organique* ou *chimique*. Commençons par les premiers et voyons tout d'abord ce que doivent devenir, lorsqu'ils sont soumis à la trituration dans l'eau, les éléments des roches silicatées les plus communes.

Le quartz se divise en fragments qui forment des *sables* plus ou moins grossiers, à grains roulés; les plus petites esquilles quartzieuses, pouvant demeurer en suspension dans les eaux agitées, se déposent plus loin du rivage, en sables fins à grains anguleux d'une remarquable uniformité. Le feldspath donne d'abord des fragments cristallins lamellaires, mais se réduit à la longue, en perdant ses alcalis, en une bouillie *argileuse*; quant au mica, ses paillettes, à peine altérées, se retrouvent, suivant les cas, associées au quartz ou à l'argile, plus fréquemment à cette dernière; car leur grande légèreté leur permet de flotter jusque dans les eaux qui tiennent en suspension des particules de vase.

De la sorte, il y a deux grandes classes de formations détritiques : les dépôts *arénacés*, c'est-à-dire de la nature des sables, et les dépôts *argileux*.

Sédiments arénacés. — Les sédiments *arénacés* peuvent être *meubles*, comme les *sables*, *graviers* et *galets*. Ils peuvent aussi être agglomérés, s'il s'est développé, postérieurement à leur dépôt, dans les interstices de leurs éléments, par suite d'une longue circulation d'eaux minérales, un *ciment* siliceux, calcaire ou ferrugineux. Dans ce cas, les sables et les graviers deviennent des *grès*, parfois des *quartzites* (quand le ciment siliceux a agi avec assez d'énergie pour faire disparaître les contours des grains de quartz et donner à l'ensemble l'apparence d'une texture uniforme). Par la même action, les galets se changent en *poudingues*, les dépôts de cailloux anguleux en *brèches*, les deux variétés pouvant être rangées d'ailleurs sous la commune dénomination de *conglomérats*. On donne le nom d'*arkoses* à des grès grossiers fortement cimentés, mais où les éléments, qui souvent sont ceux mêmes du granite, à peine modifiés, sont restés bien reconnaissables. Dans les *grès micacés*, les paillettes de mica se concentrent d'habitude sur les plans de stratification. Il en résulte des grès fissiles, dits *psammites*, qui se cassent de préférence suivant les surfaces micacées.

Sédiments argileux. Schistes, marnes. — Les sédiments argileux, sous leur forme usuelle, donnent les *argiles* proprement dites, constituées par des grains impalpables de silicates hydratés d'alumine. Ce sont de véritables *vases*, à peu près inattaquables par les acides, happant à la langue à cause de leur avidité pour l'eau, et où la dessiccation fait naître de nombreuses fentes de retrait.

Les argiles sont tantôt massives, tantôt divisées en lits minces ou *feuilletées*. Celles des terrains les plus anciens ont été, en général, durcies par l'action de la chaleur et des infiltrations siliceuses. Elles se distinguent par la facilité avec laquelle on les partage par le choc en feuillets parallèles. A cet état les argiles se nomment *schistes* ou *phyllades*. Les phyllades durs en lits très minces fournissent les *ardoises*. Quelquefois la fissilité des schistes résulte des conditions mêmes de leur dépôt et des variations correspondantes du grain ; mais souvent aussi les

plans de *clivage*, c'est-à-dire ceux suivant lesquels se débitent les ardoises, sont obliques sur la véritable stratification, et l'expérience montre qu'ils ont été produits par une compression énergique, qui a poussé les phyllades suivant une direction différente du plan des couches.

Les schistes charbonneux tachant les doigts sont connus sous le nom d'*ampélites*.

Le mélange de l'argile avec du calcaire donne des *marnes*, faisant avec les acides une effervescence plus ou moins marquée, et qui peuvent être massives, noduleuses, schisteuses ou gréseuses.

Dépôts organiques, calcaires. — De tous les dépôts organiques, les plus importants sont les *calcaires*, caractérisés par leur faible dureté (le carbonate de chaux cristallisé se raye facilement au canif) et par l'effervescence qu'ils font avec les acides, l'acide carbonique se dégageant alors sous la forme gazeuse. On y distingue :

Les *marbres*, dans lesquels le calcaire, en grains ou en lamelles, est cristallisé, tantôt pur (marbres saccharoïdes de Paros et de Carrare), tantôt micacé (cipolins), tantôt souillé de matières diverses (marbres communs noirs, gris, etc.), ou mélangé de noyaux argileux verts ou rouges (marbre griotte, marbre de Campan); les calcaires compacts, à cassure fine et *lithographique*; les calcaires *oolithiques*, en grains concrétionnés, à enveloppes concentriques, dont nous avons déjà parlé à propos des récifs coralliens et qui, avec une finesse de grain très variable, fournissent en France (Lorraine, Berry, Poitou) de très belles pierres de construction; les calcaires à *entroques*, formés d'une accumulation de débris de tiges et d'articles de crinoïdes ou de radioles d'oursins; les calcaires à *polypiers*; les *lumachelles*, constituées par une agglomération de coquilles d'huitres à reflets nacrés; les calcaires *grossiers*, où le carbonate de chaux est mélangé de matières diverses, souvent de grains de quartz ou de granules de *glauconie* (hydrosilicate de fer et de potasse); les calcaires à *foraminifères*, notamment à *nummulites*, à *miliolites*, à *alvéolines*, pétris d'enveloppes calcaires des petits êtres correspondants; les calcaires *siliceux*, les calcaires *marneux*, c'est-à-dire mélangés d'argile, et fournissant la chaux hydrau-

lique et les ciments; enfin la *craille*, roche blanche, traçante, où des enveloppes de globigérines et d'algues microscopiques sont associées à des grains amorphes de carbonate de chaux.

A cette énumération on peut ajouter certaines marnes lacustres, presque entièrement formées par des carapaces de petits crustacés d'eau douce.

Tripolis, combustibles. — Les *Tripolis* ou *farines siliceuses*, remarquables par la finesse de leur grain, sont constitués par des myriades de frustules de diatomées ou algues élémentaires. La composition de ces frustules est celle de la silice hydratée ou opale commune.

Les *combustibles minéraux* comprennent la *tourbe*, le *lignite*, la *houille* ou *charbon de terre*, plus riche en carbone, et l'*anthracite*, dernier terme de la transformation de la matière végétale. Il y faut ajouter le *bitume* et l'*asphalte*, combinaisons de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, produites par l'oxydation plus ou moins avancée des huiles minérales.

La houille, même la plus compacte, conserve encore des traces d'organisation qu'on peut mettre en évidence, soit au microscope, soit à l'aide de réactifs chimiques. Elle se montre formée de fragments végétaux, feuilles, écorces et tiges, comprimés et parvenus à divers degrés d'altération. Ceux qui ont le mieux résisté proviennent de *cuticules*, c'est-à-dire de couches épidermiques; on retrouve souvent les cuticules presque intactes dans certains lits de combustibles, notamment en Russie.

Dépôts chimiques. — Les principaux dépôts chimiques sont le *sel gemme*, qui forme des veines et des couches de puissance variable au milieu d'argiles; le *gypse* ou sulfate de chaux hydraté, généralement grenu, quelquefois même comme du sucre (gypse saccharoïde), ou cristallisé en lamelles, et se montrant en masses stratiformes qui, la plupart du temps, paraissent dériver de l'assèchement d'anciennes lagunes maritimes; l'*anhydrite* ou sulfate de chaux anhydre, qui se présente dans des conditions analogues; les *travertins lacustres*, ou calcaires déposés par des sources, en couches compactes, assez souvent cavernueuses; les *meulrières*, soit compactes, soit cariées, qui proviennent de la transformation, par des infiltrations siliceuses, d'anciens calcaires lacustres.

Nous y rangerons également les *dolomies*, composées de carbonate double de chaux et de magnésie et qui, presque toutes, semblent devoir être considérées comme d'anciennes masses calcaires, progressivement enrichies en magnésie par voie d'infiltration. Enfin il ne faut pas oublier les dépôts de *minerais de fer*, spécialement ceux de *limonite* ou peroxyde hydraté, si abondants, sous forme de couches régulières, dans l'écorce terrestre, et ceux de *fer carbonaté*, répandus au sein des terrains houillers, non plus que les *argiles réfractaires*, silicates d'alumine hydratés et très purs, qui s'isolent en amas au milieu de sables blancs.

Dépôts concrétionnés. — La plupart des dépôts chimiques et organiques, s'étant formés au milieu d'eaux tranquilles, participent, à un degré plus ou moins marqué, de la disposition des terrains sédimentaires. Du reste, il y a peu de sédiments qui, sous leur forme actuelle, n'aient aussi quelques droits à figurer parmi les formations chimiques; car ce sont des phénomènes d'ordre chimique qui ont transformé en roches solides des dépôts originellement meubles. De plus, beaucoup de sédiments se sont modifiés d'eux-mêmes, dans le cours des âges, par suite de la concentration progressive de certains éléments autour de centres particuliers d'attraction formés, soit par des particules minérales, soit par des corps organisés en décomposition. L'expérience nous enseigne qu'une masse pâteuse hétérogène, quand on cesse de la pétrir, ne tarde pas à perdre l'uniformité de sa composition et que les substances de même nature tendent à s'y grouper en concrétions noduleuses. C'est ainsi que, dans les calcaires où, à l'origine, le carbonate de chaux était intimement mélangé de particules siliceuses, celles-ci se sont peu à peu séparées en donnant naissance aux rognons de *silex* ou pierre à fusil, particulièrement abondants au milieu de la craie. D'autres fois, c'est de la silice hydratée qui s'est isolée dans une marne, produisant les concrétions connues aux environs de Paris sous le nom de *ménilite* (fig. 33). Dans de nombreuses argiles calcarifères, l'élément cal-

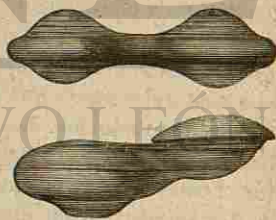


Fig. 33. — Rognon de ménilite.

caire s'est concentré en nodules, dont la surface s'est plus rapidement consolidée que l'intérieur. Aussi les progrès de la dessiccation de ces nodules ont-ils amené la formation de fentes et d'espaces creux, qui plus tard se sont tapissés de cristaux divers. On donne à ces rognons cloisonnés le nom de *septaria*.

Fossiles. — Les considérations qui précèdent nous amènent à parler des *fossiles*, c'est-à-dire des restes animaux ou végétaux qu'on trouve au milieu des dépôts sédimentaires, dans la substance desquelles ils se sont le plus souvent transformés. Ce sont les débris des êtres contemporains du dépôt des couches et tombés ou demeurés sur le fond après la mort des individus. Quand la chute et l'enfouissement ont eu lieu au sein d'une vase imperméable, non seulement la substance des coquilles, mais la couleur et certaines parties de la matière organisée, ont pu se conserver sans qu'il y ait eu d'autre altération que l'aplatissement causé par la pression des couches supérieures. Mais le plus souvent la roche encaissante a laissé circuler des infiltrations. Tantôt celles-ci ont dissous les coquilles, laissant à leur place un vide dans lequel on peut, avec de la cire, prendre l'*empreinte* du test disparu. Tantôt le vide intérieur s'est rempli d'une matière compacte qui en a pris le *moule* interne; tantôt enfin les infiltrations ont transformé la substance même de la coquille en calcaire cristallin, en silice, en oxyde de fer, en phosphate de chaux, etc. Cette transformation a pu affecter des produits autres que les coquilles ou les ossements; par exemple, il y a des nodules de phosphate de chaux qui ne sont autre chose que le résultat de la fossilisation de *coprolithes* ou excréments de vertébrés.

Assez souvent les traces de pas des vertébrés ont pu se conserver, l'*empreinte* laissée dans une couche d'argile par les pieds des animaux ayant été remplie, avant d'être oblitérée, par du sable qui s'y est consolidé ultérieurement. La même chose est arrivée plus d'une fois pour des trous de vers dans la vase, pour des traces de clapotement des vagues sur une plage et même pour les marques produites par des gouttes de pluie sur la surface d'un terrain sans consistance.

Roches métamorphiques. — Les dépôts sédimentaires, lorsqu'ils sont traversés ou recouverts par des roches éruptives, se

montrent souvent modifiés dans leur composition ou leur structure. Quand cette modification n'est due qu'à la chaleur de la roche injectée, elle ne se manifeste que sur une zone très limitée, ce qu'on pouvait prévoir d'après la faiblesse de l'action calorifique exercée à distance par les laves modernes. Sur quelques centimètres, les grès se fendillent et les calcaires durcissent, tandis que les argiles non réfractaires subissent une fusion partielle, qui les transforme en *porcelanites* ou *thermantides*.

Il en est autrement lorsqu'il s'agit de roches porphyriques et surtout granitiques, à la formation desquelles on peut admettre que les dissolvants ou, tout au moins, les eaux et les vapeurs chaudes sous pression, ont pris une part notable. Dans ce cas, la modification, connue sous le nom de *métamorphisme*, se fait sentir à plusieurs centaines de mètres du contact. Ainsi, au voisinage du granite et de la granulite, les schistes deviennent d'abord gaufrés, puis noduleux, par suite d'un mouvement moléculaire qui concentre en certains points, en la durcissant, la matière colorante charbonneuse de la roche. Plus près du contact, les nodules s'individualisent en petits cristaux prismatiques de *macle* ou *chiastolite*, silicate d'alumine à peu près pur, résultant de la cristallisation du silicate alumineux des schistes, qui deviennent ainsi *maclifères*. Enfin, au contact même, de nombreuses paillettes de mica noir se développent dans la roche, où pénètrent en même temps de très fines veinules de matière granitique. Tout massif de granite, injecté à travers des schistes, possède ainsi son *auréole métamorphique*, parfois large de 700 à 800 mètres.

Avec les calcaires, le métamorphisme produit sous l'influence des granites se traduit par une sorte de mélange du carbonate de chaux et des silicates granitiques. De là résultent de nouveaux minéraux, silicates d'alumine, de chaux et de fer, parfois de magnésie, dont les *grenats*, dits *grossulaire* et *mélanite*, sont les plus fréquents.

Les roches schisteuses qui ont été exposées, lors de la formation des montagnes, à des compressions énergiques, manifestent un métamorphisme du même genre. Il semble que, sous l'influence de la chaleur développée, l'humidité des roches ait

dû suffire pour provoquer une cristallisation partielle. Dans les mêmes conditions, les calcaires peuvent devenir des marbres très cristallins.

§ 4

PRINCIPES DE LA STRATIGRAPHIE

Notion de l'âge relatif. — Il ne suffit pas au géologue d'avoir défini la nature d'une formation, sédimentaire ou éruptive, et sa tâche n'est nullement achevée quand il a reconnu, par exemple, que tel dépôt doit être rangé parmi les calcaires oolithiques ou que tel massif d'épanchement appartient à la catégorie des granites. Il faut encore préciser l'âge de ces formations, non pas l'âge absolu, évalué en nombre d'années, ce qui n'est pas possible dans l'état actuel de la science, mais l'*âge relatif*, c'est-à-dire le rang occupé par la roche massive ou le sédiment dans la série générale des terrains dont se compose l'écorce terrestre. Cette détermination, qui fait l'objet de la *stratigraphie*, repose sur un ensemble de règles qu'il convient d'énumérer ici.

Dépôts sédimentaires. Principe de superposition. — Pour les dépôts sédimentaires (à supposer qu'il s'agisse de terrains qui n'ont pas subi de renversement), la *superposition* fournit un *criterium* certain de l'âge relatif. Tout sédiment est plus jeune que ceux qu'il recouvre et qui formaient le fond sur lequel il s'est déposé. Si donc, en un point donné du globe, on pouvait percer un puits vertical jusqu'à la croûte primitive et noter la succession des dépôts traversés, on connaîtrait, par cela même, toute la série des événements qui ont influencé, en ce point, la marche de la sédimentation. On verrait les grès céder la place aux argiles et celles-ci aux calcaires, ou réciproquement; on s'assurerait, par le genre des coquilles enfouies, que le dépôt s'était accompli tantôt sur un rivage, tantôt sous la haute mer, et parfois on constaterait que le régime marin avait, momentanément ou pour toujours, fait place à des formations d'estuaire, d'eau douce ou même continentales.

Lacunes. — Mais si l'on peut ainsi, en profitant des carrières, des tranchées de chemins de fer, des travaux de mines et des

sondages profonds, dresser une énumération très exacte des phénomènes sédimentaires successifs, on ne saurait cependant se flatter d'en obtenir partout la série complète. Plus d'une fois, en effet, le jeu de l'érosion a pu faire disparaître, en un point donné, entre deux périodes de dépôt, une certaine épaisseur de sédiments, de telle sorte que la succession offrira des *lacunes*. De plus, il s'est produit peut-être des émergences plus ou moins prolongées, pendant lesquelles la sédimentation, même d'eau douce, a été interrompue. Encore à supposer qu'aucune émergence n'ait eu lieu, comme nous savons qu'il est des cas où le fond de la mer ne reçoit pas de dépôts, il peut se faire que sans qu'un seul sédiment ait disparu, il y ait du moins une ou plusieurs lacunes dans la *représentation sédimentaire* de la série des événements, dont quelques-uns, très importants par leur influence sur les contrées voisines, n'auraient dans ce cas, au point considéré, rien qui leur correspondit.

Ce n'est donc pas à l'aide d'observations faites le long d'une seule verticale qu'on doit essayer de reconstituer l'histoire ancienne du globe; c'est par la comparaison des résultats de ce genre, obtenus sur le plus grand nombre possible de points.

Principe de continuité. — Mais ici se présente une difficulté grave, qui tient au caractère essentiellement local de la composition minéralogique dans les sédiments. Toute région de sédimentation est un ancien *bassin*, maritime ou lacustre, qui était limité par des rivages et dont l'histoire a dû différer de celle

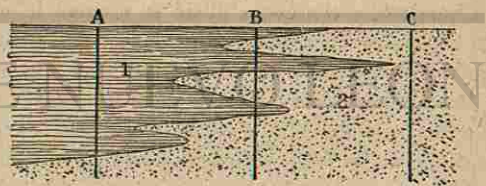


Fig. 34. — Passage d'un sédiment vaseux 1 à un sédiment arénacé 2.

des bassins plus ou moins éloignés. Même, dans l'intérieur d'un bassin donné, les dépôts changeaient soit avec la nature de la côte, soit avec la distance au rivage. D'après cela, une couche d'argile, par exemple, se transforme peu à peu, dans une direction déterminée, et passe latéralement à un sable ou à un cal-

caire. Un dépôt donné ne représente donc qu'un *épisode local*. La suite de ces épisodes, c'est-à-dire l'histoire géologique, si on la déduit d'un puits percé en A (fig. 34), à travers une couche puissante d'argile, différera sensiblement de celle qu'on établirait à l'aide d'un sondage fait en B, où l'argile alterne avec du sable, et plus encore en C, où l'élément arénacé domine sans partage. Aussi importe-t-il de trouver certains caractères qui permettent d'établir le *synchronisme* des dépôts de natures diverses, ou, comme on dit, des *facies* divers que peut revêtir une même époque sédimentaire.

Le premier de ces caractères est la *continuité* des assises. Partout où leur transformation latérale peut être suivie pas à pas, il est permis d'admettre que le dépôt a été simultané. Malheureusement l'état de la surface rend cette constatation souvent impossible et elle est très difficile dans les pays disloqués, où fréquemment des cassures interrompent les assises et les font buter contre d'autres tout à fait différentes (fig. 35). Une

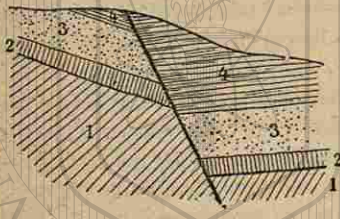


Fig. 35. — Exemple de faille.

cassure qui sépare deux massifs, dont l'un a glissé, relativement à l'autre, sur le plan de la fente, s'appelle une *faille* et la quantité dont une assise donnée a glissé se nomme le *rejet* de la faille. La rencontre d'accidents de ce genre, aussi habituels que compliqués dans les pays de montagnes, rend très malaisé le rôle du *stratigraphe*, c'est-à-dire de celui qui cherche à suivre les *strates* ou couches sédimentaires et à tracer leurs *affleurements*, autrement dit leurs intersections avec la surface du sol.

Emploi de l'argument paléontologique. — C'est alors qu'intervient avec grande efficacité l'*argument paléontologique*. Chaque sédiment, avons-nous dit déjà, contient d'ordinaire, à l'état de fossiles, les restes plus ou moins reconnaissables des êtres contemporains de son dépôt. D'autre part, l'étude de ces êtres du passé ou la *paléontologie* nous enseigne que la population organique n'a cessé de se renouveler, à la surface du globe comme

dans les profondeurs des mers; qu'à chaque époque correspondent des types spéciaux, de plus en plus éloignés de la nature actuelle à mesure qu'on remonte le cours des âges; enfin que le tout forme une série vitale parfaitement ordonnée, où il n'y a ni lacunes ni retours en arrière.

Les sédiments marins ayant beaucoup plus d'étendue que les dépôts d'origine continentale, c'est surtout aux faunes océaniques que ce *criterium* doit être appliqué, d'autant mieux que le milieu marin, par sa masse et sa profondeur, est moins exposé aux variations accidentelles qui peuvent influencer sur les êtres terrestres. Sans doute il y a des animaux propres à chaque nature de dépôts, c'est-à-dire des espèces qui fréquentent les eaux limpides, tandis que d'autres préfèrent les sédiments vaseux et d'autres encore les plages arénacées. Mais à côté, si l'on se tient à une certaine distance du rivage, on trouve des animaux qui habitent surtout la haute mer et dont les dépouilles, qu'elles tombent sur le fond ou que le flot les rejette à la côte, ont une signification paléontologique beaucoup plus générale que celle des coquilles littorales. Ce sont des êtres *pélagiques*, qui deviennent d'excellents moyens d'assimilation à distance pour les sédiments marins et, grâce à l'emploi judicieux de ce caractère, la succession des couches stratifiées acquiert chaque jour plus de précision. Par exemple, il est telle *ammonite* dont la rencontre, que le dépôt encaissant soit un calcaire, une argile ou un grès, est absolument décisive pour la détermination de l'âge relatif.

La méthode paléontologique permet de trancher, l'une après l'autre, la plupart des difficultés causées par le bouleversement des couches, et certaines anomalies, dont les stratigraphes cherchaient vainement la clef, ont été résolues par le seul secours des fossiles, animaux ou végétaux; car la méthode s'applique également, avec les précautions convenables, aux dépôts d'origine continentale.

Établissement des divisions. Discordances. — Le synchronisme des assises ayant été établi par le concours de la stratigraphie et de la paléontologie, il reste à les grouper, pour en constituer des divisions homogènes, qui partagent en périodes équivalentes la durée des temps géologiques. La succession des

épisodes locaux observés en un point fait connaître une *histoire régionale*. Sans prétendre que toutes les histoires de ce genre puissent rentrer dans le même cadre, il importe de les comparer les unes aux autres et d'en tirer les éléments d'une *chronologie* relative, applicable au globe tout entier.

Pour cela, il faut être en mesure d'apprécier la valeur des *lacunes* observées. Il y a des cas où ces lacunes sont considérables et nettement accusées par la disposition des dépôts, lorsque des couches horizontales ou peu inclinées reposent en discordance sur les tranches de sédiments plus anciens, redressés sous un angle notable (fig. 36). Alors on peut affirmer



Fig. 36. — Grès dévoniens *dd'*, reposant en discordance sur des schistes siluriens *a*.

qu'entre le dépôt des deux séries il s'est produit un grand phénomène de dislocation, d'où a pu résulter une longue interruption de la sédimentation.

D'autres fois, sans que l'horizontalité des couches ait été sensiblement affectée, on voit un dépôt reposer *transgressivement*, c'est-à-dire par débordement, sur des sédiments inégalement anciens, ce qui apporte la preuve du retour de la mer sur des territoires qu'elle avait depuis longtemps abandonnés.

Mais les *discordances de stratification*, comme on les appelle, sont loin d'avoir la généralité qu'on s'était plu dans le principe à y attribuer. A une certaine distance des points où on les observe, la série redressée montre, en profondeur, une inclinaison de moins en moins grande (fig. 37) et son allure finit par devenir tout à fait concordante avec celle des couches qu'elle supporte. Le phénomène de dislocation qui a produit la discordance a donc été local. C'est une *date* importante dans l'histoire de la région; mais cette date est sans signification pour les régions tant soit peu distantes, absolument comme les événe-

ments survenus en Europe peuvent passer inaperçus dans une autre partie du monde.

Lorsqu'une lacune a été causée par une émerision, il arrive assez souvent que le fait se révèle par l'état de la surface des dépôts. Cette surface est usée, corrodée, perforée par des mollusques *lithophages*, c'est-à-dire appartenant à des espèces qui ont l'habitude de se creuser un logement, au niveau de la mer, dans les rochers qui forment le rivage. C'est donc l'indice d'une exposition plus ou moins prolongée à l'air.

Les *discordances paléontologiques* ont une signification plus étendue. La succession des formes organiques ayant été parfait-

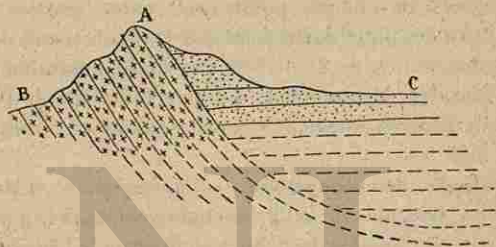


Fig. 37. — Localisation des discordances.

tement ordonnée, si, entre deux sédiments de même *facies*, formés dans des conditions analogues, par exemple entre deux calcaires crayeux ou deux argiles schisteuses, on remarque une grande différence de faunes, on en pourra conclure avec certitude que les deux dépôts, fussent-ils stratigraphiquement concordants, ont dû être séparés par un assez long intervalle, correspondant au temps qui a été nécessaire pour que le renouvellement progressif des êtres vivants pût se produire.

Valeur relative des divisions. — Par l'application de ces diverses règles, on est parvenu à établir, dans l'histoire de la série sédimentaire, des divisions de plusieurs ordres, depuis celles qui correspondent à de simples épisodes locaux, et dont la signification est alors purement régionale, jusqu'aux groupes qu'on peut reconnaître sur toute la surface du globe.

Les premières divisions ont pour base la distinction des *lits*, *couches*, ou *strates*, qui se caractérisent au point de vue de la

faune par une ou plusieurs espèces dominantes, formant un *horizon paléontologique*. Ensuite viennent les *assises* ou *zones* fossilifères, se groupant elles-mêmes en *étages* ou *sous-étages*; les étages à leur tour composent par leur association des *systèmes*, dont chacun embrasse une *période* et la réunion de plusieurs systèmes forme un *groupe*, auquel correspond une des grandes *ères* de l'histoire terrestre. Quelquefois, entre les systèmes et les groupes, on est conduit à intercaler une division en *séries*.

Plus une division est d'ordre élevé et plus grande est l'étendue sur laquelle on peut la reconnaître; mais aussi ses limites deviennent de moins en moins nettes; non qu'elles ne puissent être précisées en chaque point, mais parce que ces limites locales, justifiées individuellement par le changement des sédiments et des faunes, ne coïncident pas toutes ensemble et peuvent représenter des moments un peu différents de l'histoire générale de l'écorce, aucun événement ne s'étant fait sentir partout à la fois.

Chronologie des éruptions. — Complétons maintenant l'exposé des principes de la chronologie géologique, par l'indication des règles à l'aide desquelles on détermine l'*âge des roches éruptives*.

Toute roche éruptive est naturellement plus jeune que les terrains, stratifiés ou non, qu'elle traverse en *filons* ou dans lesquels elle a été injectée en *nappes d'intrusion*, en leur faisant parfois subir un métamorphisme notable. D'autre part, quand un conglomérat contient, à l'état de cailloux roulés, des fragments d'une roche éruptive bien déterminée, c'est que l'épanchement et la consolidation de cette roche avaient précédé le dépôt du conglomérat. Ainsi beaucoup de porphyres quartzifères ont pu être facilement classés, parce que des fragments identiques ont été retrouvés, soit dans les couches du terrain houiller, soit dans celle du grès rouge permien.

Grandes divisions géologiques. — A la base de tous les terrains se place une formation, dont l'origine est encore très discutée, parce que sa nature semble participer à la fois de la cristallisation propre aux roches massives et de la stratification qui distingue les couches de sédiment. Nous l'étudierons à part sous le nom de *terrain primitif*.

Sur ce terrain repose la série des formations fossilifères, dont l'étude conduit à diviser le passé du globe en trois grandes ères :

1^o L'ère *primaire* ou *paléozoïque*¹, où les masses continentales étaient à peine esquissées et où les conditions physiques offraient, sur toute la terre, une remarquable uniformité. Les vertébrés n'y avaient guère d'autres représentants que les *poissons*, et les faunes marines étaient caractérisées par l'immense développement des mollusques *brachiopodes*, ainsi que par le règne d'une famille de crustacés qui s'est éteinte avant même que les temps primaires prissent fin, la famille des *trilobites*.

2^o L'ère *secondaire* ou *mésozoïque*², pendant laquelle les conditions physiques ont commencé à se différencier avec les latitudes, tandis que les plantes *dicotylédones* faisaient leur apparition sur les continents. Les *reptiles* y dominaient sans partage et l'empire des mers appartenait à la famille des *ammonites*, née avec le début des temps secondaires et destinée à ne pas leur survivre.

3^o L'ère *tertiaire* ou *néozoïque*, qui a vu les continents prendre leur assiette et acquérir leurs grandes lignes de relief, pendant que les zones de climats et les provinces organiques se dessinaient d'une façon définitive. Les *mammifères*, jusqu'alors complètement atrophés, sont devenus les maîtres de la terre ferme, où le monde végétal a déployé la plus grande richesse de formes qu'il ait jamais connue.

Quant à l'ère actuelle, ou *quaternaire*, elle est caractérisée par l'apparition de l'homme, dernier venu de la Création, qui ne s'est enrichie depuis lors d'aucun type nouveau.

1. De *palaios*, ancien et *zoon*, animal.

2. *Mesos*, moyen.

CHAPITRE II

TERRAIN PRIMITIF

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR LE TERRAIN PRIMITIF

Notion de croûte primitive. — Si l'on admet, comme nous le faisons, l'idée de la fluidité primitive du globe, il faut se représenter, à l'origine des temps géologiques, notre terre comme une sphère liquide en grande partie métallique, sur laquelle les matières fondues devaient être superposées par ordre de densités. La surface était donc occupée par ces produits d'oxydation que nous avons déjà analysés en traitant des roches éruptives, c'est-à-dire par les divers *silicates*, qui formaient véritablement la *scorie* du noyau métallique. Mais ces minéraux, plus légers que les métaux sous-jacents, étant en même temps beaucoup plus réfractaires, devaient, avec le progrès du refroidissement, être exposés à prendre les premiers l'état solide. Il est vrai que cette solidification, en accroissant leur densité, les faisait descendre un peu dans la masse fluide, au sein de laquelle ils entraient de nouveau en fusion, mais en refroidissant le bain environnant. De cette manière, au bout d'un certain temps, une croûte continue a dû se prendre en masse, interceptant pour toujours le contact de la sphère fondue avec l'atmosphère extérieure. D'ailleurs cette croûte était certainement composée, en majeure partie, des silicates les plus légers, de ceux qui sont habituels aux roches acides, ce qui permet d'augurer que sa composition était analogue à celle du granite; à cette différence près que, la solidification ayant eu lieu en présence de l'atmosphère, la croûte primitive ne pouvait présenter ce grain spécial qu'a engendré, dans le granite, une très lente solidification, sous pression, dans un espace clos. En particulier, s'étant formée au

sein d'un liquide à surface libre, elle devait offrir, dans l'arrangement de ses matériaux, quelque ordonnance accusant l'intervention de la pesanteur.

Réactions initiales de la croûte. — Du reste, à peine cette pellicule était-elle formée qu'elle dut être soumise à de puissantes réactions physiques et chimiques. En effet, l'eau des océans, et avec elle les principes actifs qu'elle contient, tels que les chlorures alcalins, étaient originairement contenus en vapeurs dans l'atmosphère chaude des premiers âges, où leur présence seule engendrait une pression qu'on ne peut guère évaluer à moins de *trois cents atmosphères*. Le refroidissement qui avait fait naître la croûte a dû entraîner la rapide condensation de ces vapeurs, qui sont venues former, à la surface de l'écorce, un bain d'une puissance chimique considérable, suffisante pour déterminer, dans les matériaux de la croûte, une cristallisation semblable à celle que produisent les réactions de la voie humide.

Le même bain ne pouvait non plus manquer d'exercer sur l'écorce une action mécanique analogue à celle que la mer exerce sur ses rivages. A peine formées, les roches primitives étaient exposées à une désagrégation, bientôt suivie, sans doute, d'une cristallisation nouvelle des éléments un instant séparés. De plus, les matières fondues sous-jacentes devaient, soit refondre partiellement la base de la croûte, soit s'y injecter fréquemment en veines ou veinules.

On est donc conduit à se représenter le terrain primitif comme une sorte de produit mixte, né du refroidissement, mais où les signes de l'état igné auraient été rapidement effacés par une cristallisation chimique; massif à l'origine, mais soumis, aussi bien à la base qu'au sommet, à des actions qui ont dû lui imprimer quelques-uns des caractères des dépôts stratifiés, notamment un arrangement des éléments en zones plus ou moins parallèles.

Difficultés du sujet. — Maintenant cette croûte primitive, à supposer qu'elle se soit ainsi formée, a-t-elle pu arriver jusqu'à nous? Constamment refondue à sa base, n'a-t-elle pas dû disparaître peu à peu, de telle sorte que ce qui subsisterait aujourd'hui, comme support de tous les terrains, ne serait plus

formé que par les restes des premiers sédiments, nés de la destruction de la croûte, et modifiés par une perpétuelle injection de matières internes? Si la chose offre de l'intérêt au point de vue théorique, elle en a peu sous le rapport de la pratique; car il ne saurait y avoir une grande différence entre le résultat des diverses réactions physiques, mécaniques et chimiques, dont nous avons essayé de donner un aperçu, et celui d'une transformation de couches originairement détritiques, par injection de la substance des roches éruptives acides. Ce qui est certain, c'est que partout où la base des formations sédimentaires peut être observée, elle se présente sous un aspect très uniforme, qui contraste avec la variété des sédiments superposés, et dont les caractères paraissent s'expliquer au moins aussi bien par



Fig. 38. — Gneiss commun. — 1. Trainées de quartz et de feldspath. — 2. Lits de mica.

l'ensemble des réactions indiquées plus haut que par un métamorphisme ultérieur d'anciens dépôts détritiques. La roche fondamentale de ce terrain est le *gneiss*, qui ne peut être mieux défini que comme un *granite à éléments orientés*, auquel la disposition des paillettes de mica, en veinules ou en lits sensiblement parallèles, peut donner un aspect tout à fait rubané (fig. 38). D'ailleurs, ce gneiss manifeste à peu près partout une tendance à prendre un état granitoïde, d'autant mieux marqué qu'on s'enfonce plus bas.

C'est pourquoi, sans prétendre que la question de l'origine de cette formation soit définitivement tranchée, nous décrirons à part, sous le nom de *terrain primitif*, cet ensemble si homogène et si cristallin. Nous rappellerons seulement que, pour les auteurs qui admettent une autre manière de voir, ou qui tout au moins réservent absolument la question d'origine, le terrain de gneiss constitue, sous le nom de *groupe* ou *système archéen*, la première subdivision de la grande série sédimentaire.

§ 2

DESCRIPTION DU TERRAIN PRIMITIF

Roches primitives. — Les minéraux constituant du terrain primitif sont exactement les mêmes que ceux des roches éruptives. Il convient seulement d'y ajouter la *chlorite*, silicate d'alumine, de fer et de magnésie, qui forme des paillettes d'un vert foncé, flexibles mais dépourvues d'élasticité.

D'une manière générale, on peut dire que chacune des roches éruptives granitoïdes connues est représentée dans le terrain primitif par une variété de même composition, mais qui laisse voir un arrangement stratiforme, étant à la roche massive correspondante ce que le gneiss est au granite.

Le *gneiss*, avons-nous dit, est la roche fondamentale de ce terrain; dans le gneiss commun, le mica, en très fines lamelles, forme de minces trainées, séparées les unes des autres par des bandes où le quartz et le feldspath sont associés (voir la figure 38). Quelquefois le mica est assez abondant et assez régulièrement distribué pour que le gneiss devienne *schisteux* ou *feuilleté*, par suite de sa tendance à se débiter suivant les plans d'accumulation du mica.

Après le gneiss, la roche primitive la plus importante est le *micaschiste*, assemblage très schisteux de quartz et de mica. Ensuite viennent la *leptynite*, ou gneiss sans mica, les schistes à amphibole ou *amphibolochistes*, ceux à pyroxène ou les *pyroxénites*, enfin les schistes à chlorite ou *chloritochistes*. Quelques micaschistes à grain fin ont leur mica transformé en une substance à éclat soyeux, qu'on a longtemps prise pour du *talc* (hydrosilicate de magnésie), d'où le nom de *talcschistes* ou *talcites*, mais qui est en réalité une variété de mica, dite *séricite*.

En général, le gneiss occupe la base du terrain primitif et l'orientation du mica devient de moins en moins distincte à mesure qu'on s'éloigne du sommet de la formation, le *gneiss granitoïde* de la base passant peu à peu au granite. Les micaschistes dominent plus haut et c'est en dernier lieu qu'on

rencontre les roches amphiboliques. Souvent la série se termine par des roches schisteuses très riches en minéraux cristallisés de couleurs variées. On y trouve la *staurotide* ou *Pierre de Croix*, le *disthène* et l'*andalousite*, silicates anhydres d'alumine; le *grenat*, silicate d'alumine et de fer, le *glaucophane*, espèce bleuâtre d'amphibole, etc. Ces roches, qu'on observe à l'île de Groix, à Syra et en divers autres points des massifs primitifs, ont été appelées *éclogites*.

De toutes manières, le grand développement des schistes et la constance de leur état cristallin justifient les noms de *schistes cristallins* ou *terrain cristallophyllien*, pour désigner l'ensemble des roches primitives.

Quelquefois des amandes ou des couches d'un marbre blanc, avec paillettes de mica, dit *cipolin*, sont subordonnées à la partie supérieure des gneiss. Ceux qui considèrent tous les calcaires comme d'origine organique en tirent un argument en faveur du caractère métamorphique de la série gneissique.

Le terrain primitif, partout où il affleure, donne naissance à des sols très peu fertiles. Le gneiss fournit des moellons et du caillou pour empierrement; le micaschiste, à cause de sa fissilité, est quelquefois employé, à défaut d'ardoises, pour la couverture des maisons.

Principaux massifs de terrain primitif. France. — Le terrain primitif affleure dans un certain nombre de régions, qui paraissent avoir formé les premiers noyaux des masses continentales, ou au cœur de certaines chaînes de montagnes, dans lesquelles la puissance des refoulements a été assez grande pour amener au jour des portions de l'écorce que recouvrait antérieurement une grande épaisseur de sédiments.

En France, la plus importante de ces régions est le *Plateau Central*, qui comprend l'Auvergne, le Limousin et les Cévennes. Au-dessous des formations volcaniques, qui sont venues tardivement s'épancher à sa surface, ce plateau laisse voir partout, grâce à la profondeur des vallées qui l'entament, une grande épaisseur de gneiss et de micaschistes, dont la partie supérieure est souvent riche en amphiboloschistes, pyroxénites, serpentines et amas de cipolins, tandis qu'à la base, sous les gneiss finement rubanés, on observe du gneiss granitoïde. Dans les

Cévennes, cet ensemble paraît avoir 6000 mètres d'épaisseur, sans compter les schistes à sérécite qui le surmontent.

Une succession semblable peut être relevée dans le Morvan, qui est aussi un des anciens îlots du sol français.

En Bretagne, les sédiments primaires sont encadrés entre deux bandes de terrain primitif : celle du nord, qui forme le pays de Léon, celle du sud, qui constitue la Cornouaille bretonne et se poursuit en s'élargissant jusqu'à la Loire. Aux environs de Quimperlé, on peut constater que les gneiss un peu granitoïdes, avec micaschistes subordonnés, supportent d'autres gneiss à grain plus fin, que couronnent les micaschistes et chloritoschistes du Pouldu. Les éclogites, ou schistes à minéraux de l'île de Groix, formeraient la partie supérieure du système.

Le gneiss se retrouve encore au centre des Vosges, dans les Maures et dans les Pyrénées.

Pays étrangers. — Le nord de l'Europe paraît avoir possédé autrefois une bande très étendue de terrain primitif dont la Finlande, la Scandinavie, l'Écosse et le Groenland seraient des fragments aujourd'hui séparés. Cette bande se reliait au terrain primitif de l'Amérique du Nord, lequel couvre une grande partie du Canada, où il forme les systèmes *laurentien* (du Saint-Laurent) et *huronien* (du lac Huron) des géologues américains. Le développement des gneiss et micaschistes y est considérable, et les parties calcaires intercalées prennent une importance bien plus grande qu'en Europe. Mais les roches sont les mêmes et alternent de la même façon.

C'est dans les Alpes, à la base du Simplon, qu'on peut le mieux observer le gneiss granitoïde (fig. 39), qui s'y présente

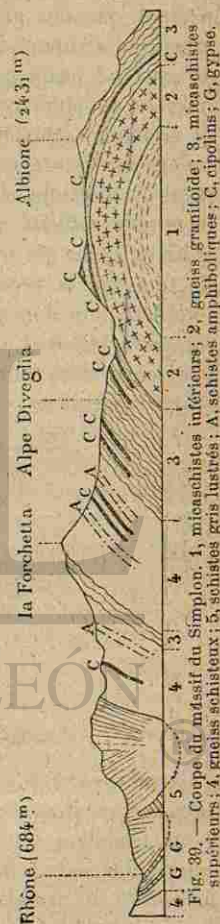


Fig. 39. — Coupe du massif du Simplon. 1, micaschistes inférieurs; 2, gneiss granitoïde; 3, micaschistes supérieurs; 4, gneiss schisteux; 5, schistes gris lustrés; A, schistes amphiboliques; C, cipolins; G, gypse.

sous une épaisseur de plusieurs milliers de mètres, tandis qu'au-dessus règnent les micaschistes et les gneiss schisteux avec amphibolites et cipolins. Ces derniers gneiss forment aussi une puissante série dans les Alpes occidentales. Enfin, au Saint-Gothard comme dans les Alpes autrichiennes, on constate partout que des gneiss granitoïdes ou granites gneissiques, avec gneiss rubanés, supportent une série de micaschistes et de gneiss à grain fin, couronnés eux-mêmes par des schistes micacés ou chloritiques, passant par transitions insensibles à de véritables schistes sédimentaires.

Cette constante uniformité du terrain primitif, sur quelque point du globe qu'on l'observe, est un fait d'une haute portée. Il semble difficile que le métamorphisme, agissant sur des sédiments, ait pu leur imprimer partout le même caractère. En tout cas, la recristallisation des éléments aurait été assez complète pour donner un produit qui ne différencierait, par aucun caractère essentiel, de celui qu'auraient engendré les conditions complexes sous lesquelles il nous a paru que la première écorce avait dû se constituer.

CHAPITRE III

ÈRE PRIMAIRE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÈRE PRIMAIRE

Caractères des premiers sédiments primaires. — L'ère primaire ayant immédiatement suivi la consolidation définitive de la première écorce, on conçoit qu'il soit très difficile de tracer une ligne de démarcation nette entre les premiers sédiments du groupe et les derniers schistes cristallins. Ceux-ci, résultat d'une cristallisation troublée par la formation de la masse océanique, ont déjà, au moins en partie, le caractère

détritique. D'autre part, en raison de la nature spéciale de l'océan primitif, l'élément cristallin n'a pu manquer de prendre part aux débuts de la sédimentation. Tel est le motif pour lequel tant de divergences règnent encore relativement à la séparation des micaschistes et talcschistes, d'une part, et des *phyllades cambriens*, d'autre part.

Ces phyllades, partout où on les observe, offrent une grande uniformité de composition. Ce sont des schistes originairement argileux (*Urthonschiefer* des Allemands), mais le plus souvent devenus durs, luisants et satinés, parsemés de veinules de quartz et remplis de cristaux microscopiques de minéraux durs. On se rend compte aisément de cette uniformité si l'on réfléchit que les inégalités de la première écorce étaient sans doute aussi faibles qu'instables, en sorte que la sédimentation devait s'exercer à peu près partout, et cela aux dépens d'un *substratum* de composition très peu variable.

Phases de l'ère primaire. — Mais à mesure que l'écorce sédimentaire s'accroît, une plus grande variété s'introduit dans les dépôts; le relief du globe commence à s'accroître, la vie se répand en abondance au milieu des eaux marines, jusqu'à ce que les continents deviennent capables de porter, avec une riche végétation, les premiers représentants des êtres terrestres. Ce progrès s'accomplit par étapes, qui motivent la division des temps primaires en quatre périodes : 1^o la période *cambrienne*, ainsi nommée de *Cambria*, nom latin du Pays de Galles; 2^o la période *silurienne*, qui tire son nom des *Silures*, anciens habitants de l'ouest de l'Angleterre; 3^o la période *dévonienne*, dont les sédiments sont nombreux dans le Devonshire; 4^o enfin la période *permo-carbonifère*, à laquelle appartiennent les grands gisements de houille et qui se termine par des formations dont le type a été choisi, en Russie, dans le gouvernement de Perm.

Période cambrienne. — Les premiers océans cambriens étaient vraisemblablement peu propres à la vie, ce qui expliquerait pourquoi les phyllades de la base du *cambrien* ne contiennent guère d'autres fossiles que des empreintes très problématiques, qualifiées d'*Oldhamia* (fig. 40), et des apparences semblables à des traces de vers.

sous une épaisseur de plusieurs milliers de mètres, tandis qu'au-dessus règnent les micaschistes et les gneiss schisteux avec amphibolites et cipolins. Ces derniers gneiss forment aussi une puissante série dans les Alpes occidentales. Enfin, au Saint-Gothard comme dans les Alpes autrichiennes, on constate partout que des gneiss granitoïdes ou granites gneissiques, avec gneiss rubanés, supportent une série de micaschistes et de gneiss à grain fin, couronnés eux-mêmes par des schistes micacés ou chloritiques, passant par transitions insensibles à de véritables schistes sédimentaires.

Cette constante uniformité du terrain primitif, sur quelque point du globe qu'on l'observe, est un fait d'une haute portée. Il semble difficile que le métamorphisme, agissant sur des sédiments, ait pu leur imprimer partout le même caractère. En tout cas, la recristallisation des éléments aurait été assez complète pour donner un produit qui ne différerait, par aucun caractère essentiel, de celui qu'auraient engendré les conditions complexes sous lesquelles il nous a paru que la première écorce avait dû se constituer.

CHAPITRE III

ÈRE PRIMAIRE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÈRE PRIMAIRE

Caractères des premiers sédiments primaires. — L'ère primaire ayant immédiatement suivi la consolidation définitive de la première écorce, on conçoit qu'il soit très difficile de tracer une ligne de démarcation nette entre les premiers sédiments du groupe et les derniers schistes cristallins. Ceux-ci, résultat d'une cristallisation troublée par la formation de la masse océanique, ont déjà, au moins en partie, le caractère

détritique. D'autre part, en raison de la nature spéciale de l'océan primitif, l'élément cristallin n'a pu manquer de prendre part aux débuts de la sédimentation. Tel est le motif pour lequel tant de divergences règnent encore relativement à la séparation des micaschistes et talcschistes, d'une part, et des *phyllades cambriens*, d'autre part.

Ces *phyllades*, partout où on les observe, offrent une grande uniformité de composition. Ce sont des schistes originairement argileux (*Urthonschiefer* des Allemands), mais le plus souvent devenus durs, luisants et satinés, parsemés de veinules de quartz et remplis de cristaux microscopiques de minéraux durs. On se rend compte aisément de cette uniformité si l'on réfléchit que les inégalités de la première écorce étaient sans doute aussi faibles qu'instables, en sorte que la sédimentation devait s'exercer à peu près partout, et cela aux dépens d'un *substratum* de composition très peu variable.

Phases de l'ère primaire. — Mais à mesure que l'écorce sédimentaire s'accroît, une plus grande variété s'introduit dans les dépôts; le relief du globe commence à s'accroître, la vie se répand en abondance au milieu des eaux marines, jusqu'à ce que les continents deviennent capables de porter, avec une riche végétation, les premiers représentants des êtres terrestres. Ce progrès s'accomplit par étapes, qui motivent la division des temps primaires en quatre périodes : 1^o la période *cambrienne*, ainsi nommée de *Cambria*, nom latin du Pays de Galles; 2^o la période *silurienne*, qui tire son nom des *Silures*, anciens habitants de l'ouest de l'Angleterre; 3^o la période *dévonienne*, dont les sédiments sont nombreux dans le Devonshire; 4^o enfin la période *permo-carbonifère*, à laquelle appartiennent les grands gisements de houille et qui se termine par des formations dont le type a été choisi, en Russie, dans le gouvernement de Perm.

Période cambrienne. — Les premiers océans cambriens étaient vraisemblablement peu propres à la vie, ce qui expliquerait pourquoi les *phyllades* de la base du *cambrien* ne contiennent guère d'autres fossiles que des empreintes très problématiques, qualifiées d'*Oldhamia* (fig. 40), et des apparences semblables à des traces de vers.

Mais après cette première phase presque *azoïque*, c'est-à-dire presque dépourvue de restes organiques certains, on voit apparaître, au milieu de formations très nettement stratifiées, schisteuses, calcaires ou gréseuses, une faune marine remarquable par son éclosion en quelque sorte immédiate. C'est celle que Barrande avait appelée *faune primordiale* et où dominent les restes de crustacés appartenant à la famille des trilobites.



Fig. 40. — *Oldhamia radiata*.

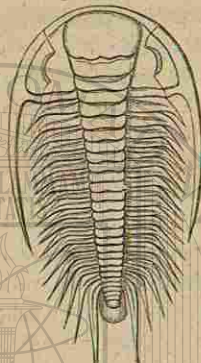


Fig. 41. — *Paradoxides Bohemicus*.



Fig. 42. — *Lingulella Davisi*.

bités et spécialement au genre *Paradoxides* (fig. 41), ainsi que de brachiopodes de la famille des *lingules* (fig. 42), destinée à traverser, presque sans altération, toute la durée des temps géologiques, tandis que l'existence des trilobites ne sera qu'éphémère.

Période silurienne. — Après ces préliminaires, des îlots de terrain primitif, noyaux des futurs continents, se dessinent, servant d'appui aux sédiments déjà très variés de la période *silurienne*. Là s'observent des schistes, des phyllades durs, des conglomérats, des grès, des *grauwackes* ou grès argileux, des quartzites, des calcaires, des minerais de fer, etc. Ces dépôts renferment d'abord de nombreux trilobites, tels que *Calymene* (fig. 43), puis une riche faune de mollusques, brachiopodes, ces derniers offrant déjà des *nautilus*, dont la longévité ne sera pas moindre que celle des *lingules*, et des *orthocères* (fig. 44), d'une durée bien plus limitée; enfin par des polypiers et des hydrozoaires tels que les curieux *graptolithes* (fig. 45), exclusivement propres à la période.

Les vertébrés font encore défaut ou du moins n'apparaissent que très tardivement, sous la forme de débris de *poissons*, et

c'est à peine si le règne végétal a laissé quelques traces, ce qui prouve à quel point les continents devaient être encore rudimentaires.

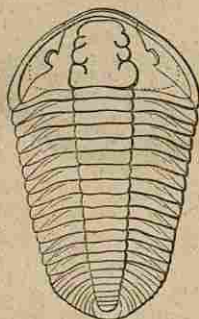


Fig. 43. — *Calymene Blumenbachi*.



Fig. 44. — *Orthoceras regulare*.



Fig. 45. — *Monograptus priodon*.

Période dévonienne. — C'est avec la période suivante, dite *dévonienne*, que s'accuse définitivement la constitution de la terre ferme, au moins dans les hautes latitudes de l'hémisphère boréal. Autour de ces massifs se forment de puissantes couches de conglomérats et de grès, renfermant en abondance des restes de *poissons*. Ces restes appartiennent, en grande partie, à la famille des *ganoïdes* (fig. 46) ou poissons cuirassés à nageoire

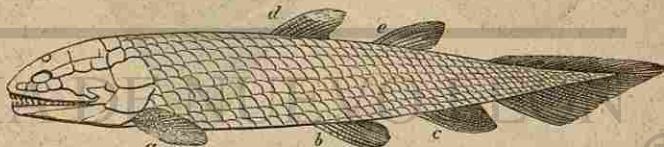


Fig. 46. — *Osteolepis*, poisson ganoïde dévonien.

caudale dyssymétrique, dont le corps était revêtu d'une véritable carapace écaillée.

Les ganoïdes ne sont plus représentés de nos jours que par un petit nombre d'espèces habitant les rivières de l'Afrique, de l'Amérique du Nord et de l'Australie; d'où l'on peut inférer que les conglomérats dévoniens ont dû se déposer dans des eaux douces ou saumâtres.

Plus loin, dans le domaine maritime, on retrouve des trilobites, tels que *Phacops* et *Cryphæus* (fig. 47), mais surtout des brachiopodes, particulièrement des *spirifères* (fig. 48) et des



Fig. 47. — *Cryphæus Michelina*
(tête et abdomen).



Fig. 48. — *Spirifer*
Verneuli.

stringocéphales; puis des céphalopodes, entre autres des *goniatites* (fig. 49); enfin de nombreux crinoïdes et des polypiers à



Fig. 49. — *Goniaticites retrorsus*.

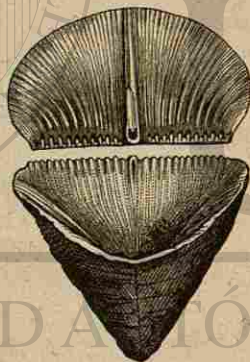


Fig. 50. — *Calceola sandalina*.

opercule, du genre *Calceola* (fig. 50), très caractéristique de la partie moyenne du système.

Un fait considérable est l'apparition sur une grande échelle, au milieu de la période dévonienne, des calcaires construits par l'activité organique. Les polypiers proprement dits et les foraminifères n'y ont que peu de part : leur rôle est tenu par les *Stromatopores* et autres organismes inférieurs, de la famille

des hydrozoaires, dont l'accumulation donne naissance à des massifs réguliers, de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

Période permo-carbonifère. Conditions du régime marin.

— Les dépôts calcaires prennent encore plus d'importance avec la période *permo-carbonifère*. Il semble que le rôle de la sédimentation détritique y soit réduit, dans les mers, à sa moindre expression. Les foraminifères, qui d'ordinaire exigent pour leur développement des eaux tranquilles, figurent parmi les plus actifs ouvriers de ces édifices calcaires, en association avec les échinodermes, les brachiopodes et les polypiers. De véritables craies à silex s'y montrent, aujourd'hui plus ou moins transformées en marbres, ainsi que des dolomies cavernueuses.

Dans tout cet ensemble marin, la faune varie très peu de la base au sommet. Il n'y a presque plus de trilobites. Parmi les brachiopodes domine le genre *Productus* (fig. 51) et, parmi les gastropodes, le genre *Euomphalus*. Les céphalopodes, en dehors de quelques goniatites et orthocères, sont peu nombreux, mais annoncent, par quelques types spéciaux, l'apparition prochaine de la famille des *ammonitidés*, qui va devenir la marque distinctive de l'ère secondaire. Au nombre des foraminifères abondent les *fusulines* (fig. 52).

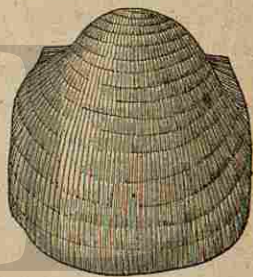


Fig. 51. — *Productus Cora*.



Fig. 52. — *Fusulina cylindrica*
(grosse).

L'uniformité de la faune permo-carbonifère est d'ailleurs aussi grande dans l'espace que dans le temps. Du Nebraska à du Brésil à l'Oural et de là aux Indes néerlandaises, les mêmes types se rencontrent, attestant la similitude des conditions physiques dans les mers.

Conditions du régime continental. — En même temps et par un remarquable contraste, des flores nombreuses et variées se succèdent à la surface des continents. Ceux-ci ont

définitivement pris leur assiette et, dans l'hémisphère boréal, ils font si bien reculer les rivages maritimes qu'à la fin de la période, c'est à peine si quelques parties de ce qui forme aujourd'hui l'Europe et les États-Unis vont se trouver sous une mer ou plutôt sous des mers à peine dignes de ce nom par leur faible étendue.

Grâce à l'influence d'un climat tropical, alors commun au globe entier, et d'une atmosphère humide, chargée d'acide carbonique, une végétation extraordinairement puissante, mais presque exclusivement composée de types d'apparence cryptogamique, sans rien qui rappelle le jeu des saisons, se développe sur la terre ferme, offrant près du pôle arctique les mêmes formes que dans les latitudes tempérées et sous les tropiques. Des pluies abondantes font ruisseler sur le sol des torrents d'eau, qui entraînent les débris des plantes avec ceux du terrain sous-jacent et vont stratifier le tout, au fond de la mer ou des lacs, en couches de conglomérats, de grès, de schistes argileux et de matières végétales. Ces dernières, désormais soustraites au contact de l'air, subiront une transformation lente qui en fera de la houille. Ainsi se trouvera emmagasinée, pour les besoins à venir de l'industrie humaine, une notable partie de l'énergie lumineuse et calorifique dépensée par le soleil durant cette époque unique en son genre.

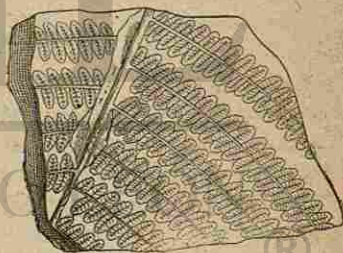
Tandis que ce phénomène de ruissellement et de dépôt se reproduit à maintes reprises, la flore, au lieu de rester stationnaire comme la faune marine, subit d'incessantes transformations. Sans doute l'atmosphère change, à mesure qu'elle se purifie par la perte d'une partie du carbone absorbé par les plantes et fixé dans les sédiments. Sans doute aussi le relief et le climat se modifient, comme semble l'attester la venue tardive des conifères, beaucoup plus abondantes pendant la dernière phase (*permienne*) de la période, et dont l'apparition semble indiquer un sol plus sec et plus accidenté.

Flore houillère. — Dépourvue de *monocotylédones* (telles que les palmiers) ainsi que de *dicotylédones* ou plantes à feuillage caduc, indices du jeu des saisons, la flore houillère abonde en *cryptogames*, avec une certaine proportion de *cycadées* et de *conifères*.

Mais les cryptogames de l'époque houillère dépassaient singulièrement en grandeur leurs congénères actuels. C'étaient des *lycopodiacées* gigantesques, les *Lepidodendron* (fig. 53) et de grandes *Sigillaria* (fig. 54), formant des arbres de 30 à 40 mètres

Fig. 53. — *Lepidodendron elegans*.Fig. 54. — *Sigillaria elegans*.

de hauteur, à feuillage maigre et piquant. C'étaient encore des fougères arborescentes (*Psaronius*) de 15 à 18 mètres, et des fougères herbacées, *Sphenopteris* (fig. 55), *Pecopteris* (fig. 56), etc.,

Fig. 55. — *Sphenopteris obtusiloba*.Fig. 56. — *Pecopteris arborescens*.

dont les frondes n'avaient pas moins de 10 mètres; enfin de grandes équisétacées, telles que *Calamites*.

Le caractère de cette végétation était la profusion plutôt que la richesse, la vigueur plutôt que la variété. Les fleurs vives et brillantes y faisaient défaut, ainsi que les formes gracieuses des arbres de nos climats tempérés.

Vertébrés et insectes permo-carbonifères. — Jusqu'à l'époque houillère, les vertébrés n'étaient représentés, d'une manière authentique, que par des poissons. Avec le carbonifère apparaissent de nombreux *reptiles*. Ce sont surtout des *amphibies*, auxquels la structure particulière de leurs dents a fait donner le nom de *labyrinthodontes*. On y voit aussi des salamandroïdes, comme ceux des schistes bitumineux d'Autun, appartenant aux dernières phases de la période. A ce même moment les vrais types reptiliens commencent à s'épanouir en Europe, tandis qu'en Afrique et en Amérique se développent des reptiles carnivores, dont les os se rapprochent, par certains détails, de ceux des mammifères.

Les trouvailles faites à Commeny ont montré que les *insectes* abondaient au milieu des forêts houillères. Quelques-uns étaient de taille gigantesque, atteignant *soixante-dix centimètres* d'envergure. La plupart appartenaient à des familles dont les représentants actuels fréquentent les lieux humides, ce qui concorde bien avec le caractère surtout cryptogamique de la flore de l'époque.

§ 2

SYSTÈME CAMBRIEN

Pays de Galles. — Nous avons signalé l'uniformité des sédiments *camabriens*, où dominent les phyllades et des quartzites plus ou moins schisteux, ainsi que la pauvreté organique de la base du système. Les dépôts de cette époque ont, dans le Pays de Galles, une énorme épaisseur, évaluée à huit ou dix mille mètres.

On y peut distinguer deux divisions. A la base s'observent des schistes, entremêlés de nombreux épanchements de roches éruptives. Au-dessus, et en discordance, apparaît un poudingue, où les éléments du groupe inférieur se retrouvent sous forme de galets. Ce poudingue est surmonté par la puissante série des schistes verts et lie-de-vin, qui fournissent les ardoises violettes si largement exploitées à Penrhyn et à Llanberis. Ensuite, après quelques intercalations gréseuses, la série schis-

teuse se poursuit sous la forme de roches noires ou grises, se débitant en dalles, et qu'on a nommées *dalles à lingules*, à cause de leur fossile dominant. Les trilobites y sont bien représentés.

Bretagne, Cotentin, Vendée. — Les affleurements *camabriens* sont nombreux dans la Bretagne et le Cotentin, où ils forment des bandes généralement allongées de l'est à l'ouest, et dans les plis desquelles les sédiments plus récents se trouvent logés.

La partie la plus ancienne du système est constituée par les *phyllades de Saint-Lô*, en couches habituellement verticales, altérées seulement sur quelques décimètres à partir de la surface et donnant une terre argileuse, peu fertile mais propre à l'établissement des herbages. Au-dessus de ces phyllades, dont les couleurs dominantes sont le gris, le vert et le brun, viennent des *schistes rouges*, souvent entremêlés de veines vertes, parfois associés à des lits de calcaire impur ou de marbre (marbres de Vieux et de Laize). Enfin le système se termine par des *poudingues pourprés*, où de gros cailloux de quartz blanc se détachent sur une pâte lie-de-vin. Ces roches, qui accusent une sédimentation tourmentée, paraissent occuper la place des couches où l'on a trouvé ailleurs les premiers trilobites. Déjà, par conséquent, les conditions de la formation des dépôts devenaient sensiblement moins uniformes.

Les phyllades *camabriens* se poursuivent en Vendée, où ils sont très souvent luisants et satinés, par suite de la séricite qui s'y est développée en fines lamelles. Cette transformation est un effet du métamorphisme. Du reste, au contact du granite qui les a percés, beaucoup des phyllades du Cotentin sont devenus *maclifères*, c'est-à-dire qu'il s'y est formé des nodules ou des cristaux de *maclé*.

Ardennes, Belgique, Plateau Central, etc. — A la même époque appartient le puissant massif de phyllades de la région ardennaise, traversé et mis à découvert par la vallée de la Meuse au nord de Mézières. Sur les deux rives du fleuve se montrent les couches fortement redressées, parfois plissées, des *schistes ardoisiers* gris de Deville, avec petits cristaux de fer magnétique; des quartzites si durs de Monthermé,

pour l'empierrement; des ardoises violettes, avec quartzites et schistes verts, de Fumay; enfin des schistes noirs des environs de Revin, parsemés de cristaux jaunes cubiques de *pyrite* ou bisulfure de fer. Une grande partie du sous-sol de la Belgique est formée par ce système, aujourd'hui caché sous les sédiments tertiaires.

On retrouve, en divers points du Plateau Central, des schistes cambriens, par exemple ceux qui fournissent les ardoises des environs de Brive. On les connaît également en Provence, ainsi que dans les Vosges, près de Barr et d'Andlau, où le granite les a sensiblement modifiés.

Dans toutes ces régions, il n'existe pas trace de la faune dite *primordiale*, celle des dalles à lingules d'Angleterre et des couches de Saint-David dans le Pays de Galles. Longtemps cette faune, caractérisée par les trilobites du genre *Paradoxides*, a passé pour ne pas exister en France. Mais on l'a récemment découverte dans le massif de la montagne Noire, au sud du Plateau Central. Il est donc permis de penser qu'à l'époque du cambrien supérieur, il régnait sur l'Europe occidentale, entre la latitude du sud de l'Angleterre et celle de l'Aquitaine, des conditions défavorables à l'existence des êtres marins. En certains points même, ce devait être un régime continental, comme semblent l'attester les conglomérats à gros blocs et à ciment pourpré de la Bretagne, du Cotentin et de l'île de Jersey. Mais au sud, les mers reprenaient leur empire et c'est ainsi que la faune à paradoxides de la montagne Noire devait se relier, d'une part à celle de l'Espagne, de l'autre à celle de la Sardaigne.

Bohême, Scandinavie, Amérique, etc. — En Bohême, les dépôts cambriens inférieurs sont constitués par des schistes et des grès schisteux à grain fin (*grauwacke de Przibram*), où l'on ne trouve que des traces de vers. Au-dessus viennent les célèbres schistes argileux de Ginetz et de Skrey, près de Prague, renfermant une véritable profusion de trilobites, notamment de paradoxides.

Bien développé en Scandinavie, sinon sous le rapport de l'épaisseur, qui est généralement faible, du moins quant à la succession des horizons fossilifères (consistant en schistes *alumi-*

fers et en plaques calcaires), le cambrien se retrouve en Espagne, en Sardaigne, au Canada (où il comprend le *grès de Potsdam*, avec traces de vers), dans les Montagnes Rocheuses, enfin au Brésil et en Chine.

C'est sur l'île de Terre-Neuve et aux environs que la faune primordiale paraît le mieux caractérisée; on y distingue trois niveaux successifs de trilobites: à la base, la zone à *Olenellus* (qui se retrouve dans les Montagnes Rocheuses); au milieu, la zone à *Paradoxides*; au sommet, celle à *Olenus*. On a pu établir la parfaite correspondance de ces horizons avec ceux de la Scandinavie, qui d'ailleurs font partie de la même bande septentrionale de sédiments.

§ 3

SYSTÈME SILURIEN

Europe septentrionale. — La localisation des dépôts, qui commençait à s'accroître dès la fin du cambrien, se prononce encore davantage avec la période *silurienne*. C'est ainsi qu'on peut distinguer une première bande septentrionale de dépôts marins, comprenant l'Écosse et la Scandinavie, et principalement constituée par des schistes gris ou noirs, souvent charbonneux, avec *graptolithes*.

Au sud s'étend une autre bande, celle qui embrasse l'Angleterre et les pays riverains de la Baltique. La série des couches siluriennes y est variée, puissante et remarquablement fossilifère, surtout dans sa partie supérieure, qui contient les célèbres calcaires de Dudley et de Gothland, riches en trilobites, en brachiopodes, en crinoïdes, en polypiers, etc. Cette bande se prolonge en Russie, où, par contraste avec les régions disloquées et métamorphiques de l'Europe occidentale, elle est constituée par des couches horizontales de grès, d'argiles et de calcaires.

Le pays classique du silurien, dans la bande en question, est le Shropshire, en Angleterre; c'est là qu'on voit se succéder, reposant sur les dalles à lingules, d'abord des couches de passage, à *graptolithes*; puis les *schistes de Llandeilo*, le *calcaire de Bala*, le *grès de Caradoc*; ensuite les *schistes de Llandovery*, sur-

montés par l'assise si fossilifère de *Wenlock* (à laquelle appartient le calcaire de Dudley); enfin l'assise de *Ludlow*, où apparaissent les premiers restes de poissons. Le tout a près de 6000 mètres d'épaisseur.

Europe centrale. — Le silurien de la Bohême, depuis longtemps illustré par les richesses paléontologiques que Barrande en a exhumées, forme un ensemble distinct de celui de la bande anglo-baltique.

A la base sont les schistes et les grès de l'étage D de Barrande, correspondant aux couches d'Angleterre qui sont inférieures à l'assise de *Llandovery*, tandis que celles de *Wenlock* et de *Ludlow* ont pour équivalents les étages E et F, remarquables par leurs calcaires marmoréens si fossilifères. Les orthocères jouent dans ces calcaires un très grand rôle, comme du reste en Russie.

Malgré leur proximité, le Hartz et la Bavière diffèrent sensiblement du type de la Bohême, tant par la composition des sédiments que par la distribution des fossiles, ce qui montre quels progrès avait déjà faits la différenciation du régime des mers.

Bretagne, Cotentin. — C'est encore à un autre type qu'appartiennent les dépôts siluriens du territoire français, bien développés en Bretagne ainsi qu'au Cotentin. Une importante assise arénacée, liée par des conglomérats ou des *arkoses* aux poudingues pourprés du cambrien supérieur, en forme partout la base, accusant le voisinage d'un ancien continent; c'est le *grès armoricain*, roche dure, blanchâtre, souvent véritable quartzite, excellent pour l'empierrement. Ses caractères s'observent bien dans la chaîne si pittoresque de rochers qui s'étend de Domfront à Mortain, ainsi qu'en de nombreux points de la Loire-Inférieure, de l'Ille-et-Vilaine, de la Mayenne, de la Sarthe, de l'Anjou, enfin à la Montagne du Roule, près de Cherbourg. Ce grès, aux affleurements très infertiles, marqués par des landes que jonchent des pierres blanchâtres, ne contient guère que des tubes d'annélides (*Scolithus*, *Tigillites*) et de curieuses impressions bilobées en relief, dites *bilobites* (fig. 57). Autrefois les bilobites étaient attribués à des algues; aujourd'hui on les regarde de préférence comme des moulages, formés par du sable à l'intérieur des traces que le passage de divers animaux avait pu laisser à

la surface d'une couche de vase. Un tel sédiment n'a pu se déposer que dans des eaux très peu profondes.

Aux grès à bilobites succède, par l'intermédiaire d'une couche assez constante de minerai de fer hydroxydé, l'assise des *schistes à calymènes*. Argileux dans le nord de la Bretagne, ces schistes deviennent plus durs au sud et c'est dans leur masse que sont ouvertes les immenses ardoisières d'Angers. La déformation des trilobites y est habituelle et accuse l'énergique compression subie par les couches postérieurement à leur dépôt.

Dans le Calvados et le Cotentin, une ou plusieurs assises arénacées s'intercalent au sommet de l'assise schisteuse et donnent naissance à une nouvelle masse de

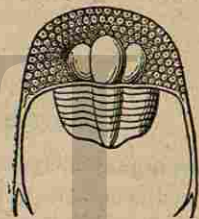


Fig. 57. — Bilobite (*Cruziana rugosa*). Fig. 58. — *Trinucleus Pongerardi*.

grès, habituellement en petits bancs, de coloration rosée. C'est le *grès de May*, qu'on retrouve aussi dans l'Ille-et-Vilaine, supportant de nouveaux schistes noirs, avec trilobites que leur tête, composée de trois noyaux bien distincts, a fait nommer *trinucleus* (fig. 58).

Tout cet ensemble correspond au silurien inférieur de l'Europe orientale (étage *armoricain*). L'étage supérieur ou *bohémien*, celui qui renferme les riches gisements fossilifères de l'Angleterre, de la Bohême et des régions baltiques, paraît à peine représenté en France, comme si déjà la mer silurienne tendait à s'y assécher. On y doit rapporter les schistes noirs, avec concrétions calcaires à graptolithes et orthocères, de Feuguerolles (Calvados) et de Saint-Sauveur-le-Vicomte (Manche), ainsi que certains calcaires de la Loire-Inférieure.

Régions diverses. — Le grès à trilobites se retrouve en Espagne et au Portugal. Le silurien supérieur, sous forme de calcaires noirs avec schistes charbonneux, tachant les doigts, existe aux environs de Luchon, dans la partie centrale des Pyrénées, tandis que, dans le Languedoc, la place de l'assise à calymènes est occupée, à Neffiez, par des schistes avec gros nodules, contenant des trilobites gigantesques.

Très richement représenté en Amérique, où une de ses assises, à l'état calcaire, forme le déversoir de la célèbre chute du Niagara, et où une autre renferme des gisements de sel, le silurien se retrouve au Brésil, en Inde, en Chine et dans la zone arctique. Là il a été observé par 82° 40' de latitude nord et de grands polyptères calcaires y ont été recueillis, attestant que le climat des tropiques, nécessaire au développement de ces organismes, devait alors s'étendre jusqu'au pôle.

§ 4

SYSTÈME DÉVONIEN

Grande-Bretagne. — Dès l'ouverture de la période dévonienne, le continent boréal, qui avait servi d'appui aux sédiments marins du silurien de l'Europe septentrionale, fait vers le sud de sensibles progrès. En Écosse et dans le nord de l'Angleterre, là où s'étaient déposées les couches fossilifères de la période précédente, il se forme des lacs intérieurs ou au moins de grandes lagunes, impropres à la vie marine, et l'érosion continentale y entasse des milliers de mètres de grès bruns ou rouges, de schistes, de marnes et de conglomérats, constituant le *vieux grès rouge* (*old red sandstone*) des Anglais, où abondent les restes de poissons ganoïdes.

La mer est alors rejetée au sud, dans le Devonshire. De là elle vient toucher le Boulonnais et se dirige vers l'est, où il lui faut franchir une passe étroite, sur l'emplacement de la vallée de la Meuse, entre Namur et Charleville.

Région ardennaise. — A ce moment, presque toute la Belgique est émergée, ainsi qu'une partie de la France septentrionale. Dans le détroit de la Meuse, les sédiments s'accumulent,

variant de nature avec une grande rapidité, et il suffit de la distance de Namur à Givet pour que, au même instant, des couches très diverses viennent tapisser le fond de la mer.

Non loin de Fumay, à Fepin, au milieu des versants boisés qui dominent la Meuse, on voit des poudingues et des arkoses, marque d'un ancien rivage, reposer en discordance sur les phylades cambriens. Au-dessus se développent des *grawwacks* grises (c'est-à-dire des schistes d'où l'élément calcaire a disparu, laissant subsister de petits espaces vides) et des grès noirs ou verdâtres, à pavés; puis des schistes très rouges avec poudingues (*poudingue de Burnot*) et des minerais de fer (oligiste de Couplevoie). Alors il semble que la sédimentation détritique ait produit son principal effort. Des schistes calcaires, avec calcéoles, se déposent en couches réglées et on y voit apparaître des lentilles de *marbre* (marbres de Trélon et de Couvin), construites par les organismes et atteignant parfois plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Ce nouveau *facies* calcaire et marmoréen devient tout à fait prépondérant à l'époque du *calcaire de Givet*, ou calcaire à stringocéphales, dont les masses bien stratifiées sont largement exploitées sous la citadelle de Charlemont. Mais bientôt la sédimentation vaseuse reprend et le calcaire ne forme plus, au milieu des schistes, que des nodules ou des lentilles isolées d'un marbre tantôt bleuâtre, tantôt bariolé et qualifié de *griotte* (marbres de Frasne et de Fromelennes).

L'élément calcaire disparaît ensuite tout à fait et un schiste infertile se montre seul sur la région de la Famenne, en attendant qu'aux approches du Condros le *facies* arénacé s'introduise sous la forme de grès micacés, finement stratifiés, dits psammites, avec lesquels se termine le dévonien ardennais.

Eifel; région rhénane; Europe orientale. — Au delà des Ardennes la mer dévonienne s'épanouit de nouveau, couvrant l'Eifel et toute la Westphalie. Les sédiments de la base se montrent dans la chaîne du Taunus, transformés par le métamorphisme en quartzites et en schistes micaés ou *sériciteux* (la séricite est une variété de mica). Au-dessus vient l'importante assise de la *grawwacke de Coblenz* ou grès à spirifères, suite de schistes décalcifiés, de grès et de quartzites, bien visible sur les

bords de la Lahn ainsi que sur le Rhin, entre Coblantz et Bonn ¹. Cette assise supporte dans le Nassau et dans l'Eifel un calcaire à stringocéphales ², parfois transformé en minerai de fer et surmonté lui-même par des schistes à goniates, qui contiennent la faune du dévonien supérieur ou étage *famennien*.

Une série assez conforme à la précédente s'observe dans le Hartz. Mais en Bohême le dévonien n'est plus représenté que par sa partie tout à fait inférieure, intimement liée au silurien. Il n'en existe pas de traces dans les régions baltiques et, pour le retrouver, il faut pénétrer en Russie. Là, par une heureuse coïncidence, des couches d'eau douce ou saumâtre, contenant les poissons du vieux grès rouge anglais, alternent avec des sédiments marins, ce qui permet de trancher la question, longtemps controversée, de l'âge de l'*old red*.

Bretagne, Plateau Central, etc. — A la fin de la période silurienne, la région de l'Armorique et du Cotentin paraît avoir été constituée à l'état d'île, à peu près dans ses limites actuelles. Sur les bords seulement, du côté de Brest comme dans la basse Loire et près des frontières du Maine, de l'Anjou et de la Normandie, la mer pénétrait par quelques échancrures, où l'étage *rhénan* a presque seul laissé des traces. Ce sont des dépôts tantôt arénacés et de couleur claire (grès de Gahard), tantôt calcaires et marmoréens, de teinte sombre (calcaires de Gahard, de Néhou, de Brulon, de la rade de Brest, de Chalennes et de Montjean), tantôt schisteux et décalcifiés (grauwacke du Faou, près de Brest).

Très rare aux abords du Plateau Central, où il n'existe guère qu'en un point de l'Allier, le dévonien se retrouve dans le Languedoc, près de Neffiez (où reparaissent les griottes), en divers points de l'Espagne, notamment aux Asturies et dans la province de Léon; puis sur le Bosphore, dans le Sahara et le Maroc, en Chine, au Brésil, enfin dans l'Amérique du Nord, où il est très puissant et très varié, mais difficile à paralléliser avec le dévonien d'Europe.

1. D'où le nom d'étage *rhénan*.

2. Étage *eifélien*.

§ 5

SYSTÈME PERMO-CARBONIFÈRE

Conditions géographiques de l'Europe pendant la période permo-carbonifère. — La période permo-carbonifère s'ouvre par des mouvements du sol, qui creusent dans les continents dévoniens des sillons où pénètre la mer. Autour des massifs anciens, tels que la Bretagne, les Vosges, le Nassau, le Hartz, la Bohême, l'Écosse, se forme une frange de dépôts arénacés et schisteux, habituellement compris sous la dénomination générale de *Culm*, et où les débris végétaux sont parfois mêlés aux fossiles marins, souvent aussi à des tufs éruptifs. Mais plus au large et surtout dans l'espace qui sépare l'ancien continent boréal des îles auxquelles se réduit encore la partie moyenne de l'Europe, ce sont des calcaires qui se déposent, en une large trainée qu'on peut suivre depuis l'Irlande jusqu'en Westphalie et qu'on retrouve ensuite sur le territoire russe, lorsqu'on a doublé le cap de la Saxe et de la Bohême.

Après cette première époque dite *anthracifère*, le régime continental reprend le dessus. Les rivages marins reculent peu à peu, et là où les organismes calcaires venaient d'édifier leurs puissantes constructions, des eaux torrentielles vont jeter dans la mer, en la comblant de proche en proche par leurs deltas, des masses de matières végétales et de sédiments détritiques. C'est l'époque *houillère*, au début de laquelle se constituent les riches bassins de la Grande-Bretagne, du Pas-de-Calais, de la Flandre, de la Belgique, du Limbourg, de la Westphalie et de la Silésie, ainsi que de petits bassins lacustres, isolés dans les dépressions des massifs anciens.

Bientôt un important mouvement du sol accentue les plis anthracifères, en y faisant participer les calcaires déjà déposés. La mer se retire et le phénomène d'accumulation des combustibles se poursuit non plus dans la mer, mais dans des lacs à l'intérieur des continents, donnant naissance aux trainées de bassins houillers du Plateau Central, des Cévennes, des Vosges, de la Bohême, des Alpes, de l'Espagne septentrionale. A la fin, l'Europe est presque entièrement émergée et il ne s'y dépose

plus guère que des grès rouges, lorsque, sur les régions septentrionales, la mer revient un moment, sous forme de nappes peu propres à la vie organique, et dont les dépressions se combent par des dépôts de sel et de gypse. C'est l'époque *permienne* ou *pénéenne*¹.

Tandis que ces choses se passent dans les régions septentrionales et moyennes de l'Europe, tout autre est la condition de la zone méditerranéenne. Au delà des îlots anciens, tels que le Plateau Central de l'Espagne, le massif des Maures, etc., ce sont des calcaires qui vont se déposer, non seulement durant la phase anthracifère, mais aussi pendant les deux autres. Ces calcaires s'observent en Carinthie et en Carniole, où l'on peut constater que la partie moyenne, celle qui correspond à notre étage houiller des bassins anglais et franco-belges, abonde en foraminifères du genre *Fusulina*. Enfin, en Russie, on voit se souder, en quelque sorte, le *facies* continental et le *facies* de mer ouverte ou pélagique. Pendant que de véritables couches de houille s'y intercalent parmi les calcaires de l'étage anthracifère, des *calcaires à fusulines*, souvent blancs et presque crayeux, apparaissent à la place des faisceaux houillers de l'Europe occidentale; et ils sont couronnés par d'autres calcaires, qu'on suit vers l'est au delà du Caucase, et qui représentent le type pélagique de l'étage permien.

Grande-Bretagne. — Les divisions du système permio-carbonifère, dans la Grande-Bretagne, sont depuis longtemps classiques, en raison de l'importance que les exploitations houillères ont prise dans ce pays avant tous les autres.

A la base se trouve le *calcaire de montagne* (*mountain limestone*), quelquefois puissant de 1200 mètres, entièrement marin et le plus souvent marmoréen. Ensuite vient le *grès meulier* ou *millstone-grit*, épais de 120 à 1700 mètres. Ce grès sert de support au terrain houiller productif ou *coal-measures*, ensemble de schistes, de grès, d'argiles et de minerais de fer, de 1500 à 3600 mètres, avec une épaisseur moyenne de houille de 15 à 22 mètres. Cette richesse est habituellement répartie en un assez grand nombre de couches, dont la puissance est en

1. Ainsi nommée de sa *pauvreté* en restes organiques.

moyenne de 60 centimètres. Plusieurs retours de fossiles marins, dans les schistes qui encaissent le charbon de terre, attestent que la formation s'est accomplie dans des deltas.

Tandis que le calcaire de montagne appartient à l'étage anthracifère, le *millstone-grit* et les *coal-measures* représentent l'étage houiller et principalement sa partie inférieure, celle que caractérise la grande abondance des *sigillaires*. La partie supérieure de l'étage houiller est mal représentée en Angleterre. Mais le *permien* y apparaît sous la forme d'un grès rouge dit *nouveau grès rouge inférieur* (par opposition au vieux grès rouge dévonien), qui supporte un *calcaire magnésien* ou dolomitique, à faune marine très atrophiee.

A mesure qu'on se rapproche du nord, l'élément calcaire diminue dans l'étage anthracifère, lequel en arrive à contenir les bassins houillers les plus productifs de l'Écosse.

Flandre, Belgique, Westphalie. — En Flandre et dans le détroit qu'on peut appeler franco-westphalien, coïncidant avec la vallée de la Sambre, puis avec celle de la Meuse de Namur à Liège, le *calcaire carbonifère* est très développé. Il débute par les calcaires schisteux de Tournai, avec le marbre bleu à fragments d'encrines des Écaussines, que sa structure cristalline et grenue a fait nommer *petit granite*. Ensuite viennent des calcaires gris avec bancs de silex, que couronne le marbre ou *calcaire de Visé*, abondant en *Productus* et auquel est subordonnée une dolomie grise, massive, cavernueuse, qui se présente aux environs de Namur en escarpements ruiniformes très pittoresques.

Au-dessus de cet ensemble, dont la puissance atteint un millier de mètres, se développent des schistes noirs très durs, puis des *ampélites* ou schistes très noirs à fossiles marins. Alors apparaît le *terrain houiller*, épais de près de 3000 mètres et contenant jusqu'à 160 couches de houille, d'une puissance variable entre 0^m,40 et 4^m,60. En général, les houilles maigres occupent la base; puis viennent les charbons demi-gras, ensuite les charbons gras, riches en matières bitumineuses et, au sommet, à Mons, les charbons à gaz ou *flénus*. Les schistes qui encaissent la houille sont riches en empreintes végétales, appartenant comme celles d'Angleterre à la zone des *sigillaires*, et non seule-

ment l'étage houiller supérieur, mais tout le permien, font défaut dans la région.

Le terrain houiller de ces contrées a d'ailleurs subi des bouleversements considérables, dont on peut se faire une idée par la figure 59.

Les conglomérats sont absents du terrain houiller d'Angleterre, de Flandre et de Belgique. Rarement le grain des grès y

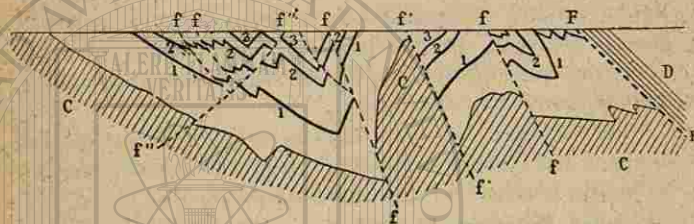


Fig. 59. — Coupe du bassin houiller de Liège — D, schistes dévoniens; C, calcaire carbonifère; 1, 2, veines de houille; 3, couche de grès; F.F, grande faille; f, f, failles secondaires.

atteint la grosseur d'un pois et le plus souvent ces grès sont psammitiques, c'est-à-dire schisteux et micacés. La conservation des empreintes végétales dans les schistes est très remarquable.

A plusieurs reprises des couches marines ou saumâtres s'intercalent au milieu des schistes à végétaux terrestres.

Le bassin houiller belge se prolonge, par le Limbourg, jusqu'en Westphalie, où 132 couches de houille, réparties entre 2400 mètres de sédiments, forment 74 mètres de charbon exploitable. Le calcaire carbonifère, qui les supporte, se modifie peu à peu vers l'est par l'intercalation d'assises schisteuses et arénacées.

Bretagne, Bassin de la Sarre, Vosges. — Un changement complet se manifeste lorsque, quittant la bande marine qui longeait le bord du continent boréal, on s'avance vers le sud, où les massifs de la Bretagne, des Ardennes, des Vosges, étaient partiellement ou totalement émergés.

Tandis que, sur les bords du continent armoricain, des calcaires marins anthracifères s'observent à Sablé et à Changé, ainsi que des gîtes d'antracite appartenant au même étage, le

bassin de la Sarre, qui occupe au sud des Ardennes une large dépression parallèle à la chaîne du Hunsrück, ne contient que des éléments d'eau douce, et presque toute la houille y appartient à l'étage houiller supérieur, celui que caractérisent surtout les *fougères*. En outre, le permien y est très développé, avec abondance de *grès rouges* et de *tufs porphyriques*.

Ces mêmes grès rouges et tufs se retrouvent dans les Vosges, où ils contiennent, notamment au val d'Ajol, des troncs silicifiés de fougères arborescentes. Dans le voisinage, autour du Ballon d'Alsace, l'étage anthracifère est représenté, sous son facies du *Culm*, par la *grawacke de Thunn*, grès verdâtre à empreintes végétales très distinctes de celles de l'étage houiller, et offrant, tantôt des intercalations à coquilles marines, tantôt des brèches à fragments de *porphyrite*, qui établissent son passage à des tufs éruptifs.

Plateau Central. — C'est encore sous le facies détritique du *Culm*, avec rares intercalations calcaires, que se présente l'étage anthracifère aux abords du Plateau Central et du Morvan. On y doit rapporter la *grawacke* et le *grès à anthracite* du Roannais, ainsi que les poudingues et grès à fragments de porphyrite du Morvan. L'époque houillère moyenne, celle des sigillaires, n'a laissé d'autres traces que les grès et schistes stériles de Rive-de-Gier. En revanche, l'époque supérieure, celle des *fougères*, est richement représentée, d'abord par le faisceau houiller de Saint-Étienne, ensuite par les bassins de Decazeville et de Commentry. L'abondance des conglomérats, l'irrégularité des veines de houille, des schistes et des grès, l'absence de tout fossile marin, attestent un régime à la fois continental et beaucoup plus violent que celui qui présidait à la formation des bassins du nord.

Les *schistes bitumineux* d'Autun, riches en huile minérale, avec débris de poissons et de reptiles terrestres, signalent l'aurore de l'époque permienne, qui s'est poursuivie par le dépôt des *grès rouges*, avec marnes schisteuses rouges et vertes, des environs de Brive.

Saxe, Russie, Amérique, etc. — Il ne saurait convenir de décrire ici les différents territoires permio-carbonifères du globe. Nous ajouterons seulement, aux renseignements qui

précèdent, quelques indications relatives aux types les plus remarquables.

A ce point de vue, il importe de signaler la composition du permien dans le nord de l'Allemagne et spécialement dans la Saxe. L'étage débute par une puissante assise d'eau douce, le *grès rouge* ou *rothliegende*, avec empreintes de conifères du genre *Walchia*. Ce grès supporte un schiste bitumineux peu épais, mais remarquable à la fois par ses poissons et par les minerais de cuivre et d'argent dont il est imprégné. C'est le *schiste cuivreux* du Mansfeld. Enfin le retour de la mer est annoncé par le *zechstein*, calcaire dolomitique à faune marine atrophiee, avec importants dépôts de sel gemme, de gypse et d'anhydrite, comme celui de Stassfurt.

En Russie, ainsi que nous l'avons déjà dit, tandis que l'étage anthracifère contient des couches de houille à sa base, l'étage houiller est représenté par des *calcaires blancs*, crayeux, à *fusulines*, qu'on retrouve aussi en Styrie.

Enfin, en Amérique, le bassin des Apalaches et surtout celui de l'Illinois montrent bien la transition du *facies* continental houiller au *facies* pélagique; car de nombreuses couches calcaires à fossiles marins s'y intercalent au milieu des grès et schistes houillers. Plus à l'ouest, dans les Montagnes Rocheuses, toute la formation, depuis l'anthracifère inférieur jusqu'au permien supérieur, se trouve à l'état de calcaires marbres et de grès marins, comme ceux dans lesquels est entaillé le Grand Cañon du Colorado.

Nous terminerons cette rapide énumération en disant que le carbonifère marin est développé au Spitzberg et même à la terre de Grinnel, enfin que la flore anthracifère de l'île des Ours présente les mêmes types végétaux que celle du Culm européen. Comme la flore houillère du Zambèse et celle d'Australie offrent aussi plus d'une espèce connue en Europe, on en doit conclure qu'à cette époque il régnait sur tout le globe une remarquable uniformité de conditions physiques.

§ 6

MODE DE FORMATION DE LA HOUILLE

Structure de la houille. — La formation du combustible minéral est l'événement le plus caractéristique de la période permo-carbonifère. Bien que le même phénomène se soit reproduit à d'autres époques, jamais il n'a affecté une pareille ampleur. Aussi convient-il de s'arrêter un instant sur les circonstances qui l'ont déterminé.

La houille est une substance franchement minérale, insoluble dans les hydrocarbures et n'offrant en général, au premier aspect, aucune trace d'organisation. Cependant le microscope et certains réactifs chimiques y décèlent des cellules végétales, toujours plus ou moins comprimées et, dans les gisements du centre de la France, il arrive souvent qu'on y puisse reconnaître, à l'œil nu, des troncs aplatis de fougères arborescentes ou d'autres arbres, des écorces et des feuilles de *Cordaites*, *Calamodendron*, etc. Par des observations de ce genre, on a réussi à établir¹ que chaque couche de houille était formée de résidus végétaux, à divers degrés de désorganisation, comprenant des tiges, des écorces, des rameaux, des feuilles, et que tous ces débris étaient *posés à plat*, se recouvrant les uns les autres, comme des matériaux qui ont flotté librement dans un liquide. Aux éléments végétaux encore discernables est associée une substance amorphe, *humique* ou *ulmique*, semblable à celle qu'on obtient en soumettant, à l'action de la chaleur et de la pression, le sucre, l'amidon, les gommés et autres produits dérivés des végétaux.

Caractère sédimentaire de la houille. — D'autre part, la houille se présente en véritables couches, souvent d'une merveilleuse régularité, encadrées au milieu de strates argileuses et arénacées, dont l'origine sédimentaire ne peut faire l'objet d'aucun doute. Les schistes charbonneux dans lesquels le combustible est encaissé sont des argiles remplies de menus débris végétaux, et il y a bien des couches de houille qui, par leurs

1. Grand'Eury, *Flore carbonifère de la Loire*.

impuretés, établissent un passage graduel entre ces schistes dits *bitumineux* et le combustible minéral proprement dit.

Ces passages sont surtout fréquents dans les bassins lacustres du centre de la France. Les études faites à Commentry¹, où l'ampleur des exploitations à ciel ouvert offrait à l'observation des facilités exceptionnelles, ont montré que la houille de ces régions était une *alluvion végétale*, versée dans l'eau d'un lac par les eaux torrentielles qui dégradaient les pentes avoisinantes. Tandis que les galets et les graviers tombaient à la tête du talus de déjection, les matières argileuses étaient entraînées plus loin et les débris végétaux plus loin encore, sous une

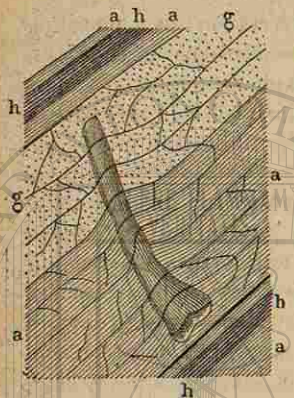


Fig. 60. — Tige fossile dans le terrain houiller d'Anzin. — a, argile schisteuse; g, grès; h, houille et schiste bitumineux.

moindre inclinaison. Les tiges, charriées lors de ces débâcles, tantôt se déposaient à plat, tantôt échouaient au milieu des graviers, dans toutes les positions possibles, même verticales (fig. 60). Ainsi s'explique l'abondance, au milieu de certains grès houillers, de tiges dressées de *Calamites*, ordinairement dépourvues de racines et de feuilles et qu'on avait autrefois considérées, mais le plus souvent à tort, comme des arbres ayant vécu à la place même où l'on observait leurs restes.

Les couches de houille sont toujours superposées à des schistes argileux, jamais à des grès. C'est une raison de plus pour y voir le résultat d'une *préparation mécanique*, qui a groupé au sein de l'eau, suivant leurs densités respectives, les matières entraînées par ruissellement. Cette préparation a été plus ou moins complète suivant la violence du régime des eaux et, de cette manière, tantôt les fines parcelles végétales sont restées intimement mélangées à l'argile, donnant de sim-

1. Par M. H. Fayol

ples *schistes bitumineux*, tantôt la couche de débris végétaux, bien séparés des matières terreuses, s'est régulièrement étalée avec une épaisseur uniforme, tantôt elle a formé, au milieu des sédiments vaseux, des amas inégaux, donnant naissance à des couches de houille en *chapelet*, c'est-à-dire pourvues de renflements et d'étranglements. D'autres fois, un apport violent de matériaux en aura recouvert un autre, de formation plus tranquille, et, à partir d'un certain point, les deux couches végétales se montreront appliquées l'une sur l'autre et confondues, tandis qu'en deçà elles seront séparées par un intervalle stérile, comme si une couche unique s'était dédoublée.

De cette manière, au lieu d'exiger pour sa formation un grand nombre d'années (comme on l'admettait dans l'hypothèse d'une végétation décomposée sur place), chaque couche de houille aurait pu être le produit d'une seule inondation, capable de déposer, à côté, plusieurs mètres de graviers et de vases. Seulement la transformation des végétaux en houille se serait accomplie ultérieurement, par décomposition lente, à l'abri de l'air. Du reste cette transformation elle-même ne paraît pas avoir exigé de longs siècles; car certains bassins du centre de la France renferment, dans leurs conglomérats, des *cailloux de houille* bien définie. La minéralisation des couches de débris végétaux était donc pleinement accomplie à la base du bassin, quand les sédiments de la partie supérieure se sont formés.

Conditions des bassins maritimes. — L'hypothèse de la formation de la houille par flottage, qui explique toutes les particularités des bassins lacustres et, notamment, le passage progressif de certains conglomérats à des couches de houille réglées, paraît devoir être étendue aussi aux gisements de la grande bande septentrionale européenne. En effet, dans ces derniers, le caractère sédimentaire des dépôts est encore mieux accusé, et les éléments des lits de charbon de terre sont les mêmes, quoique à un état de division plus avancé. Mais ce fait, joint à l'absence des conglomérats et même des grès grossiers, prouve seulement que les eaux étaient animées d'une moindre vitesse et que le dépôt se faisait à une plus grande distance du lieu d'origine des matériaux. Cela se comprend sans peine,

puisqu'il s'agit, non plus de ruissellements passagers sur les bords d'un lac, mais de masses d'eau débouchant dans la mer et y stratifiant leurs alluvions comme dans le delta d'un grand fleuve. On conçoit que ces alluvions, plus ou moins étalées par les vagues, aient acquis à la fois moins d'épaisseur et plus d'étendue; que les coquilles marines y soient de temps en temps présentes; que d'autres fois elles laissent la place à des mollusques d'eau saumâtre (*Anthracosia*, *Anthracomya*), analogues aux moules de rivière; enfin que jamais des fossiles terrestres ou d'eau douce ne soient associés aux couches de houille, ce qui n'aurait pas manqué de se produire, si la houille résultait de la transformation sur place d'une végétation tourbeuse, comme on l'a longtemps admis. D'ailleurs, par le progrès naturel du delta dans une mer profonde, combiné avec un tassement graduel, les couches devaient finir par se superposer les unes aux autres en nombre considérable. Il n'est donc pas nécessaire, pour expliquer cette superposition, d'admettre une série indéfinie d'affaissements, hypothèse inconciliable, du reste, avec le fait dominant de la période houillère, qui est le gain progressif de la terre ferme sur la mer.

Ajoutons que si la plupart des couches de houille ont été formées par flottage, il n'est pas impossible que quelques-unes d'entre elles résultent de l'enfouissement d'une végétation de nature tropicale, établie à la surface des atterrissements d'un delta, pendant une émergence momentanée. Ainsi s'expliqueraient certains cas où l'on a cru reconnaître, avec certitude, la présence de racines en place dans les argiles servant immédiatement de base à la houille.

Idée générale du phénomène houiller. — Voici donc l'idée générale qu'il semble permis de se faire du phénomène houiller : sous l'influence d'une température chaude, d'une atmosphère humide et lourde, les continents fraîchement émergés étaient revêtus d'une végétation luxuriante, dont aucune intempérie ne venait jamais interrompre le développement. Le sol se garnissait, au fur et à mesure de la chute des branches et des tiges, d'une abondante couche de débris végétaux, les uns à peine altérés, d'autres presque totalement décomposés et laissant se dégager les principes gras et féculents dont ils

étaient chargés. De temps à autre, des pluies violentes s'abattaient sur le sol, entraînant, soit à la mer, soit dans les dépressions lacustres, les arbres déracinés, les fougères arrachées, la couche de détritux végétaux qui en garnissait le pied et jusqu'au terrain lui-même. Une fois submergés, tous ces débris se séparaient par ordre de densités, les végétaux se tenant toujours au sommet. Mais promptement enfouie sous un nouvel apport d'alluvions, la couche végétale n'arrivait pas à la surface et achevait, à l'abri de l'air, sa transformation, consistant en une oxydation lente de l'hydrogène et, par suite, un enrichissement progressif en carbone.

D'après cela, on comprend sans peine que les diverses couches de houille puissent être très inégalement riches en principes volatils et qu'il y ait des houilles *maigres*, très pauvres en produits bitumineux, et des houilles *grasses* qui en sont abondamment pourvues. Il suffit de se rappeler que les matières résineuses et grasses qu'on retire des feuilles donnent, par la chaleur et la pression, un produit analogue au bitume. Dès lors il n'est pas indifférent qu'une couche de houille soit constituée d'écorces plutôt que de feuilles, ni que telle famille végétale ait pris plus de part que telle autre à la formation de l'amas, ni enfin que la couche de détritux ait subi, avant son entraînement, une décomposition plus ou moins complète. Ce que les mineurs appellent le *fusain*, ou charbon mat tachant les doigts, si fréquent dans beaucoup de houilles, représente des fragments à demi pourris de tiges ou de rameaux, qui étaient tombés au milieu des écorces et des feuilles non encore décomposées.

Il convient de dire aussi que certaines houilles ont subi, par suite de la chaleur développée dans les mouvements du sol, une distillation partielle, qui a pu les priver de leurs principes volatils et les transformer en *anthracite*.

Minerais de fer du terrain houiller. — Le *minerai de fer* se montre très souvent subordonné à la houille. En Angleterre et en Écosse, de nombreux lits de *fer carbonaté*, dit *black band*, alternent avec les schistes houillers. Il en est de même dans les schistes permien du bassin de la Sarre, à Lebach, où le fer carbonaté tend à se concentrer en rognons aplatis, dans l'inté-

rieur desquels on trouve des restes de reptiles, notamment d'*Archegosaurus*. En Amérique, ce sont souvent des feuilles de fougères qui occupent le centre de rognons semblables, et tous les détails de la nervation y sont conservés avec une netteté merveilleuse. Le minerai exploité dans le bassin d'Alais, à Pallemalade, est aussi carbonaté et subordonné à une assise de grès et de poudingues, séparant deux faisceaux houillers.

Le fer carbonaté représente le premier état d'oxydation du fer. Il ne peut se produire que dans les milieux où dominent les influences réductrices, et la moindre oxydation le change en *limonite* ou peroxyde hydraté. La source des actions réductrices qui ont présidé à sa formation est d'ailleurs facile à reconnaître dans la masse de menus débris organiques contenus au sein des schistes qui encaissent le carbonate. Par l'action de ces débris, suffisante pour absorber tout l'oxygène disponible, le fer de la houille est demeuré, tantôt à l'état de carbonate de protoxyde, tantôt à l'état de *pyrite* ou *bisulfure*, dont les lamelles, d'un jaune de laiton, brillent si souvent sur le fond noir de la plupart des houilles.

§ 7

ÉRUPTIONS DE L'ÈRE PRIMAIRE

Caractères généraux des éruptions primaires. — Pendant toute la durée de l'ère primaire, l'activité interne paraît s'être donné carrière par une série en quelque sorte continue de manifestations. Tantôt les roches éruptives sont arrivées jusqu'à la surface, s'épanchant en nappes sous-marines, ou même en coulées à l'air libre, accompagnées de projections et de tufs, dont quelques-uns peuvent être d'anciennes cinérites; tantôt elles ont traversé, en filons plus ou moins puissants, une épaisse série de terrains; tantôt enfin elles se sont bornées à remplir des dômes de soulèvement, se logeant dans l'axe de *plis anticlinaux*, c'est-à-dire de voûtes allongées, sans parvenir jusqu'au jour.

Dans les pays depuis très longtemps émergés, comme la Bretagne et surtout le Plateau Central, l'érosion, poursuivie pen-

dant une suite incalculable de siècles, a fini par mettre à découvert ces roches de cristallisation profonde, qui sont généralement des *granites*, en faisant disparaître la tête des plis qui les recouvraient. Mais ce travail n'a pu se poursuivre sans amener la destruction d'une grande épaisseur de roches de surface, parmi lesquelles, peut-être, se trouvait plus d'une coulée éruptive, dont toute trace aurait ainsi disparu, si l'on n'en retrouvait parfois quelques vestiges parmi les conglomérats formés aux époques géologiques qui ont vu s'accomplir ces destructions.

D'autre part, il est des régions, comme le Trégorrois, l'île de Jersey, le pays de Galles, etc., où l'on peut encore observer, en place, des roches très anciennes d'épanchement superficiel et même des tufs, ainsi que des produits de projection datant presque de l'aurore des temps sédimentaires.

Nous nous bornerons ici à mentionner quelques-uns des principaux types éruptifs de l'Europe occidentale, en les rapportant, autant que possible, aux périodes pendant lesquelles a dû avoir lieu la sortie des roches.

Éruptions cambriennes. — Des roches éruptives d'âge cambrien s'observent dans le nord du pays de Galles, sous la forme de *porphyres pétrosiliceux*, en coulées au milieu des schistes qui constituent la base du système. D'ailleurs ces porphyres se retrouvent en cailloux roulés, dans le conglomérat qui sert de base aux ardoises violettes de Llanberis, de telle sorte que l'âge cambrien, et même cambrien inférieur, des éruptions ne peut faire l'objet d'aucun doute.

Un centre encore plus important existe dans l'île de Jersey. Là encore, un conglomérat, de l'âge du poudingue pourpré du Cotentin, renferme des galets des roches éruptives qui traversent les phyllades sous-jacents. Mais la série en est bien plus variée; car elle comprend du *granite* proprement dit, du *granite à amphibole* et de la *syénite*, des *diorites*, de la *pegmatite*, en fait de roches de profondeur; puis, formant des nappes et des coulées, des *porphyrites*, des *porphyres pétrosiliceux* et des *granulophyres*, accompagnés de brèches et de tufs de projection.

Une série très analogue existe sur la côte de Bretagne, dans le Trégorrois.

Les phyllades cambriens des environs de Granville renferment des galets d'un granite commun, identique avec celui des îles Chausey. Enfin, dans les schistes cambriens du Cotentin, le granite dit de Vire a été injecté en longues bandes, avant la formation des poudingues pourprés. Cette injection a déterminé, dans les schistes encaissants, un métamorphisme qui en a fait des *schistes maclifères*, par développement de petits noyaux et même de cristaux de *macle*. Des faits analogues ont été observés en Alsace et dans bien d'autres contrées.

Éruptions siluriennes. — Le nord du pays de Galles, et spécialement la région du Snowdon, offrent d'incontestables exemples d'éruptions d'âge silurien, représentées par des *porphyres*, des *porphyrites* et des *tufs*, qu'on trouve intercalés au milieu du silurien moyen.

En Bretagne, les assises du silurien supérieur de la baie de Douarnenez présentent de fréquentes intercalations de *diabases*, accompagnées de brèches et de *tufs de projection*. Il est probable qu'il convient de rapprocher de ces nappes les grands filons de la même roche qui traversent le cambrien du Cotentin, et qu'on suit parfois sur plus de 12 kilomètres. La roche, d'un vert foncé, est compacte et fournit des matériaux recherchés pour l'empierrement.

Ce sont aussi des *diabases*, en nappes régulières, qui alternent en Bohême avec les premiers sédiments du silurien supérieur, ceux qui contiennent des graptolithes.

Éruptions dévoniennes et carbonifères. — Parmi les éruptions dont l'âge dévonien est incontestable, on peut citer les coulées de *diabases*, avec *tufs*, qu'on observe dans le Nassau et le Hartz. Il est probable que beaucoup de *pegmatites* et de *granulites à tourmaline*, comme celles de Cornouailles en Angleterre et du Mont Saint-Michel en France, datent de la même époque, bien que leur formation ait pu se poursuivre jusqu'au début de la période anthracifère. C'est à cette dernière phase que doivent être rapportés la plupart des *porphyres quartzifères* ou *granophyres* de France; notamment ceux de la rade de Brest (dont l'éruption a été presque immédiatement suivie par la sortie de filons de *Kersanton*), et les porphyres du Morvan, ainsi que ceux du Plateau Central; car toutes ces roches se retrouvent en

galets dans les conglomérats du terrain houiller supérieur.

Quant au granite de Flamanville, qui certainement a métamorphosé le dévonien du Cotentin, son éruption date, ou du dévonien supérieur, ou de l'anthracifère.

Les granites postérieurs au silurien abondent en Bretagne. C'est ainsi que les schistes siluriens à calymènes des Salles de Rohan ont été changés en *schistes maclifères*, contenant de très grands cristaux de *macle*, par l'influence de massifs granitiques ou granulitiques voisins. Un autre de ces massifs a fait subir le même métamorphisme aux schistes anthracifères des environs de Carhaix. Le granite qui a produit cette action, celui de Rostrenen, est remarquable par la dimension extraordinaire de ses cristaux de feldspath. Du même âge est le beau granite porphyroïde du Huelgoat, qui forme de si pittoresques amoncellements de rochers.

Les *pegmatites* et les *granulites* jouent un rôle important dans le Limousin et le Plateau Central de la France. Ces mêmes roches sont très développées en Angleterre, dans le pays de Cornouailles, où leur fréquente association avec des minerais d'étain leur a fait donner le nom de *granites à étain*. Ce qui distingue ces roches granulitiques, en général dévoniennes ou anthracifères, c'est, avec la présence fréquente de la *tourmaline* (silicate d'alumine avec acide borique), l'abondance du mica blanc d'argent et la présence de divers minéraux contenant du fluor.

Aux époques dont il vient d'être question, il devait y avoir de vrais appareils volcaniques, dont les projections engendraient des *tufs*, tels que les *tufs porphyritiques* du Morvan, subordonnés à la base du permo-carbonifère.

Enfin la période houillère a été souvent marquée par la sortie de *porphyres globulaires* et par celle de roches basiques ou neutres, à texture compacte, de teinte verte foncée, connues sous le nom générique de *trapps*. Beaucoup de ces *trapps* sont des *porphyrites* riches en mica. Quelques-uns sont accompagnés de *tufs* qui ont beaucoup d'analogie avec les *cinérites*.

Éruptions permienes. — Les éruptions ont continué à l'époque permienne. Seulement nous ne connaissons pas, avec certitude, de roches granitiques datant de cette époque. Même,

les *porphyres*, qui forment des coulées très nettes, parfois divisées en prismes, y sont le plus souvent *pétrosiliceux*, comme si la puissance de cristallisation avait été en diminuant avec le temps. Leur sortie a été parfois accompagnée de celle de roches tout à fait vitreuses, comme les *pechsteins* de la Saxe et ceux du Var, ou bien de roches à globules, dites *pyromérides*.

On a la preuve que de nombreuses manifestations thermales et solfatarieuses se sont produites lors du permien inférieur. C'est à cette cause que doit être attribuée la formation des *tufs* argileux violets ou *argilolites* du val d'Ajol, dans les Vosges, tufs à demi sédimentaires, qui contiennent de nombreux restes silicifiés de végétaux, et à côté desquels on observe de grands filons de quartz, tous plus ou moins métallifères.

Les roches basiques de l'époque permienne, notamment les *mélaphyres*, abondent dans le Palatinat; ces roches se rapprochent à bien des égards des basaltes actuels. Plusieurs sont vacuolaires et leurs cavités ont été remplies par divers minéraux, tels que l'agate.

Résumé. — En résumé, l'activité éruptive paraît avoir été à peu près continue pendant toute la durée des temps primaires. D'une manière générale, au moins jusqu'à l'époque houillère, les roches acides prédominent. Leur position est d'ailleurs assez caractéristique. Les granites forment, comme nous l'avons déjà dit, de larges traînées, occupant le plus souvent l'axe de plis convexes ou *anticlinaux*. Ils ont donc dû se solidifier dans la profondeur, sous une pression qui maintenait les dissolvants et à l'abri de toute rapide déperdition de la température. A ces circonstances devraient être attribués, d'abord l'état si cristallin des granites, ensuite l'influence qu'ils ont exercée sur les roches voisines, en y faisant pénétrer peu à peu les gaz et les vapeurs répandus dans leur masse.

Loin d'avoir forcé l'entrée des terrains encaissants en les disloquant, les granites et les roches analogues y ont trouvé leur chemin en les *corrodant*, en quelque sorte, à la manière d'un acide. On peut dire, du reste, que toutes les roches éruptives ont joué, dans les dislocations, un rôle passif, profitant, pour s'y injecter, des cassures ou des rides produites par des phéno-

mènes mécaniques, dont les éruptions étaient généralement la conséquence et non la cause.

Les filons détachés des massifs granitiques ou granulitiques ont toujours un grain plus fin et prennent quelquefois une structure porphyrique, qui accuse deux temps de consolidation. Ces deux temps sont très nettement visibles dans les filons et surtout dans les nappes des divers porphyres, dont les différences doivent tenir à ce que les uns se sont épanchés à l'air libre, tandis que les autres arrivaient au fond de la mer et des lacs. La dernière consolidation ayant été assez rapide, les effets métamorphiques des porphyres sur les roches voisines sont généralement très faibles.

Il convient de remarquer le développement que paraissent avoir pris en Europe, à l'époque du grès rouge permien, les émissions solfatarieuses et thermales. Dans la nature actuelle, ce genre d'émanations signale habituellement la décroissance de l'activité volcanique. Or justement, dans nos pays, les éruptions étaient destinées à cesser, d'une manière à peu près complète, pendant toute l'ère secondaire. Les argilolites et les émissions siliceuses du permien marqueraient donc le déclin d'une activité interne qui allait bientôt s'endormir.

CHAPITRE IV

ÈRE SECONDAIRE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÈRE SECONDAIRE

Caractères généraux et divisions de l'ère secondaire. —

Le groupe *secondaire* ou *mésozoïque* comprend les formations sédimentaires qui se sont déposées depuis la purification définitive de l'atmosphère terrestre jusqu'au réveil de l'activité interne. Cette dernière, après avoir été particulièrement effi-

les *porphyres*, qui forment des coulées très nettes, parfois divisées en prismes, y sont le plus souvent *pétrosiliceux*, comme si la puissance de cristallisation avait été en diminuant avec le temps. Leur sortie a été parfois accompagnée de celle de roches tout à fait vitreuses, comme les *pechsteins* de la Saxe et ceux du Var, ou bien de roches à globules, dites *pyromérides*.

On a la preuve que de nombreuses manifestations thermales et solfatarieuses se sont produites lors du permien inférieur. C'est à cette cause que doit être attribuée la formation des *tufs* argileux violets ou *argilolites* du val d'Ajol, dans les Vosges, tufs à demi sédimentaires, qui contiennent de nombreux restes silicifiés de végétaux, et à côté desquels on observe de grands filons de quartz, tous plus ou moins métallifères.

Les roches basiques de l'époque permienne, notamment les *mélaphyres*, abondent dans le Palatinat; ces roches se rapprochent à bien des égards des basaltes actuels. Plusieurs sont vacuolaires et leurs cavités ont été remplies par divers minéraux, tels que l'agate.

Résumé. — En résumé, l'activité éruptive paraît avoir été à peu près continue pendant toute la durée des temps primaires. D'une manière générale, au moins jusqu'à l'époque houillère, les roches acides prédominent. Leur position est d'ailleurs assez caractéristique. Les granites forment, comme nous l'avons déjà dit, de larges traînées, occupant le plus souvent l'axe de plis convexes ou *anticlinaux*. Ils ont donc dû se solidifier dans la profondeur, sous une pression qui maintenait les dissolvants et à l'abri de toute rapide déperdition de la température. A ces circonstances devraient être attribués, d'abord l'état si cristallin des granites, ensuite l'influence qu'ils ont exercée sur les roches voisines, en y faisant pénétrer peu à peu les gaz et les vapeurs répandus dans leur masse.

Loin d'avoir forcé l'entrée des terrains encaissants en les disloquant, les granites et les roches analogues y ont trouvé leur chemin en les *corrodant*, en quelque sorte, à la manière d'un acide. On peut dire, du reste, que toutes les roches éruptives ont joué, dans les dislocations, un rôle passif, profitant, pour s'y injecter, des cassures ou des rides produites par des phéno-

mènes mécaniques, dont les éruptions étaient généralement la conséquence et non la cause.

Les filons détachés des massifs granitiques ou granulitiques ont toujours un grain plus fin et prennent quelquefois une structure porphyrique, qui accuse deux temps de consolidation. Ces deux temps sont très nettement visibles dans les filons et surtout dans les nappes des divers porphyres, dont les différences doivent tenir à ce que les uns se sont épanchés à l'air libre, tandis que les autres arrivaient au fond de la mer et des lacs. La dernière consolidation ayant été assez rapide, les effets métamorphiques des porphyres sur les roches voisines sont généralement très faibles.

Il convient de remarquer le développement que paraissent avoir pris en Europe, à l'époque du grès rouge permien, les émissions solfatarieuses et thermales. Dans la nature actuelle, ce genre d'émanations signale habituellement la décroissance de l'activité volcanique. Or justement, dans nos pays, les éruptions étaient destinées à cesser, d'une manière à peu près complète, pendant toute l'ère secondaire. Les argilolites et les émissions siliceuses du permien marqueraient donc le déclin d'une activité interne qui allait bientôt s'endormir.

CHAPITRE IV

ÈRE SECONDAIRE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÈRE SECONDAIRE

Caractères généraux et divisions de l'ère secondaire. —

Le groupe *secondaire* ou *mésozoïque* comprend les formations sédimentaires qui se sont déposées depuis la purification définitive de l'atmosphère terrestre jusqu'au réveil de l'activité interne. Cette dernière, après avoir été particulièrement effi-

cace à la fin des temps primaires, paraît s'être, du moins en Europe, endormie pendant toute la durée de l'ère secondaire, dont le début seul a été marqué par quelques éruptions analogues à celles de l'époque permienne. Durant cette ère de calme, où les fentes de l'écorce se sont tapissées de matières minérales diverses, les vertébrés de la famille des reptiles ont régné en maîtres à la surface du globe; c'est à peine si l'on retrouve les vestiges de quelques mammifères inférieurs, précurseurs de l'âge à venir, et les oiseaux, qui ont apparu vers la fin de cette division des temps géologiques, possèdent des caractères mixtes qui les rapprochent beaucoup des reptiles. La végétation terrestre a perdu la puissance extraordinaire qu'elle avait à l'époque houillère, et la prépondérance appartient, non plus aux espèces de terres basses et humides, mais à celles de la famille des cycadées et des conifères. Ce n'est que tardivement qu'on voit apparaître les premiers représentants des monocotylédones et des dicotylédones angiospermes, destinées à prévaloir dans l'ère tertiaire, à la faveur des conditions physiques nouvelles que vont créer, d'une part le relief plus accentué du sol, d'autre part la distribution de plus en plus inégale de la chaleur et de la lumière. En attendant, la flore secondaire offre, comme la faune, un caractère mixte, qui a valu à l'ère correspondante l'épithète de *mésophytique*.

Dans les mers, où le développement des formations calcaires et la rareté relative des conglomérats attestent la tranquillité du régime océanique, on voit prédominer les mollusques et surtout les céphalopodes de la famille des *Ammonitidés*, qui apparaissent nombreux dès le début de l'ère nouvelle, dont ils peuvent d'autant mieux servir à caractériser toutes les phases, qu'ils ne doivent pas lui survivre. Enfin la classe des poissons s'enrichit d'un nouveau type, celui des *téléostéens* ou poissons osseux.

Le groupe secondaire a été divisé en cinq grands systèmes. Le premier est le système *triasique*, si intimement lié au permien que quelques géologues n'ont pas cru pouvoir l'en séparer et ont décrit sous le nom de *groupe poecilien* (*poikilitic*) cet ensemble caractérisé par ses couleurs bariolées. Au-dessus vient la *série jurassique*, comprenant le système *liasique* et le système

oolithique. Enfin l'ère se termine avec la *série crétacée*, dans laquelle il convient de distinguer un système *crétacé inférieur* ou *infra-crétacé* et un système *crétacé supérieur*.

Période triasique. — Au début de la période triasique, les mers intérieures qui couvraient une partie de l'Europe septentrionale se sont asséchées; mais une mer largement ouverte occupel'emplacement du bassin de la Méditerranée et ne tarde pas à envoyer vers le nord des bras qui, par moments, arrivent jusqu'au pied de l'Ardenne et du Hunsrück. Toujours restreintes dans l'ouest de l'Europe, où elles n'atteignent pas l'Angleterre, ces invasions marines deviennent la règle dans la région orientale. Aussi cette dernière est-elle le théâtre d'une active formation de calcaires avec organismes pélagiques, tandis que, à l'ouest aussi bien que dans l'Amérique du Nord, on voit prédominer les lacs salés et les lagunes, dont le fond se comble avec des argiles et des grès aux couleurs vives et bariolées.

Les plages incertaines de ces lagunes sont fréquentées par de nombreux *reptiles labyrinthodontes*, tels que *Chirotherium*, dont les traces de pas (fig. 61) abondent en Saxe comme au Connecticut, et par d'autres reptiles, ceux-là bipèdes, les *dinosauriens*, signalés par des traces à trois doigts, qui offrent une grande analogie avec celles des oiseaux.

Les mers largement ouvertes voient s'épanouir, parmi les céphalopodes, la grande famille des *ammonitidés*, représentée par *Ceratites* (fig. 62), *Trachyceras* (fig. 63), etc., tandis que, au nombre des acéphalés, prospère le genre *Halobia* (*Daonella*)



Fig. 61. — Traces de *Chirotherium*.

(fig. 64) et que d'innombrables échinodermes de la famille des Encrines (fig. 65) laissent leurs dépouilles dans les calcaires de l'époque. Avec ces genres nouveaux persistent un certain nombre de types anciens de brachiopodes et de céphalopodes,

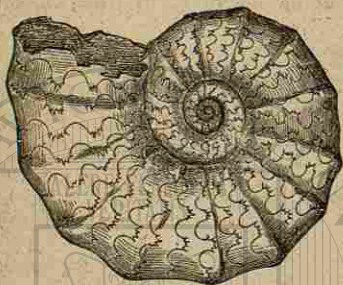


Fig. 62. — *Ceratites nodosus*.



Fig. 64. — *Halobia (Daonella)*
Lommeli.



Fig. 63. — *Trachyceras*
(*Ammonites*) *Aon.*



Fig. 65. — *Encrinurus*
liliiformis.

grâce auxquels la faune marine triasique offre en quelques points un caractère de transition.

Quant à la flore, elle ne contient plus les sigillaires de l'époque houillère; les véritables prêles (*Equisetum*) y sont nombreux; les conifères, telles que *Voltzia*, les cycadées et les fougères arborescentes y abondent.

Période liasique. — Les invasions successives de la mer, qui s'étaient produites en Europe lors de la période triasique, présageaient la fin prochaine du régime continental, dont la

dernière époque houillère avait vu l'avènement dans les latitudes moyennes de l'hémisphère boréal. Tandis que, dans la partie orientale de l'Amérique du Nord, le sol va demeurer émergé pendant presque toute la durée des temps secondaires, le nouveau régime marin s'installe en Europe avec l'ouverture de la période liasique, inaugurant la série des dépôts dits jurassiques à cause de leur développement dans les monts Jura.

Comme preuve de ce retour de la mer sur des régions depuis longtemps émergées, on voit partout, dans le nord de l'Europe, les dépôts liasiques débiter par des grès, où les grains roulés et grossiers de quartz empâtent de nombreux restes de vertébrés ainsi que des dents de poissons. C'est un véritable ossuaire, comme l'indique le nom classique de *bone-bed* ou lit à ossements. Les êtres marins et terrestres y sont mélangés, et c'est là qu'on voit apparaître des débris de petits marsupiaux, premiers représentants de la classe des mammifères.

Alors commence une époque de sédimentation marine, mais littorale, où les restes de végétaux et d'insectes terrestres se montrent plus d'une fois associés aux coquilles de mer. Les plages sont fréquentées par de grands reptiles nageurs, les sauriens, ichthyosaures (fig. 66), plésiosaures (fig. 67), etc., dont les squelettes entiers abondent dans certains gisements de l'Angleterre et du Wurtemberg. Les pois-

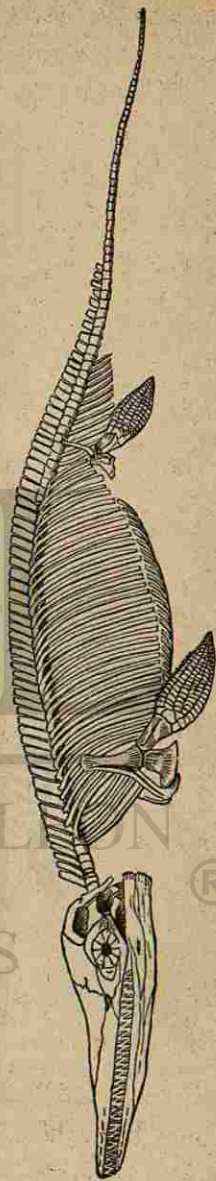


Fig. 66. — *Ichthyosaurus communis*.

sons ganoïdes de l'époque (*Lepidotus*) ont cessé d'avoir leur nageoire caudale dyssymétrique.

Les vraies ammonites, aux cloisons persiliées, sont nombreuses (fig. 68, 69, 70). Avec elles se montre une nouvelle famille de céphalopodes, celle des bélemnites, représentées par leurs osselets ou rostres (fig. 71, 72). Les huîtres se développent pour la première fois avec une grande ampleur, jonchant les dépôts argileux de coquilles de gryphées (fig. 73), auxquelles s'ajoutent parfois des plicatules (fig. 74). A côté de brachiopodes de type ancien, comme *Spiriferina*, pullulent les rhynchonelles et les térébratules (fig. 75). Enfin les crinoïdes sont fréquents et souvent très bien conservés.

Quant à la flore, elle se fait remarquer par l'apparition des premiers monocotylédons et par le grand nombre des cycadées qu'elle contient. De plus, les caractères de la végétation de la période accusent à la fois une grande monotonie et l'absence de zones climatologiques bien définies.

Période oolithique. — Tandis que, dans le bassin anglo-français, la sédimentation détritique dominait à l'époque liasique, les dépôts oolithiques paraissent s'y être formés dans des conditions particulières de calme.

Les sédiments arénacés et les conglomérats sont l'exception,

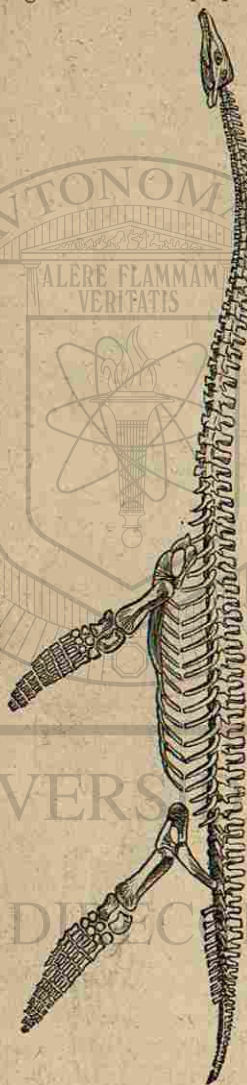


Fig. 67. — *Plesiosaurus dolichoterrus*.

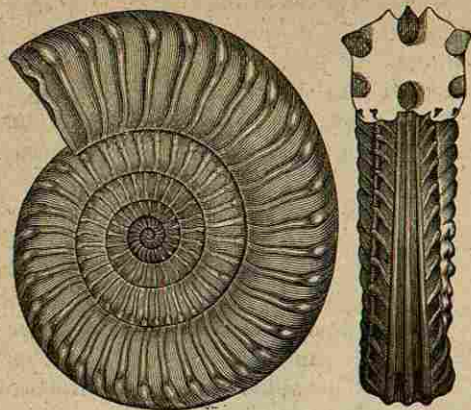


Fig. 68. — *Ammonites (Arietites) Bucklandi*.

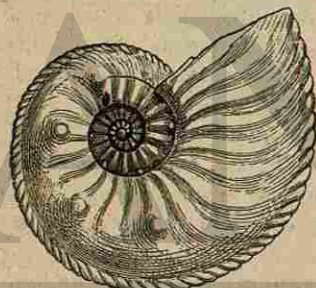


Fig. 69. — *Ammonites (Amaltheus) margaritatus*.

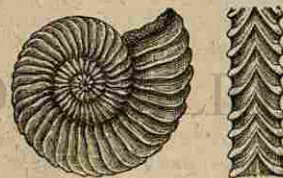


Fig. 70. — *Ammonites (Shlotheimia) angulatus*.



Fig. 71. *Belemnites brevis*.
Fig. 72. *Belemnites clavatus*.

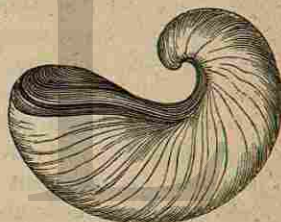


Fig. 73. — *Gryphaea arcuata*.



Fig. 74. — *Plicatula spinosa*.

et ce qui domine, à toutes les hauteurs, c'est le *facies oolithique*, indice presque assuré de formations coralliennes¹. Du reste, en beaucoup de points, les anciens récifs de polypiers se dessinent de la façon la moins équivoque, offrant, dans leur faune et leur structure, les caractères qui, de nos jours encore, sont particuliers à ce genre de formations. Ainsi, durant cette période, exempte de toute manifestation violente de l'activité interne, les organismes ont édifié, dans l'Europe occidentale et centrale, de puissantes assises calcaires, occupant le milieu des bassins dont les sédiments liasiques formaient les bords et le fond.



Fig. 75. — *Terebratulites* (*Waldheimia*) *numismalis*.

La tendance générale, dans le nord et l'ouest de l'Europe, est dirigée vers l'émergence progressive et tranquille des détroits qui, jusqu'alors, séparaient les îlots de terrain primitif. Par là se prépare l'avènement d'une époque surtout continentale qui, dans ces contrées, marquera la fin des temps jurassiques.

Dans les parages méditerranéens, les dépôts sont d'une autre nature et indiquent que le régime pélagique continuait à prévaloir. Là dominent les calcaires, souvent marmoréens, avec organismes de haute mer.

La présence de récifs coralliens jusqu'au 55° degré de latitude, et l'existence d'une végétation subtropicale sous le 71° parallèle, attestent d'ailleurs à quel point les différences devaient être peu sensibles dans la distribution géographique de la chaleur et de la lumière.

Les mammifères oolithiques sont encore de petits marsupiaux, notamment des rongeurs analogues au kangourou-rat. Un oiseau à affinités reptiliennes, le célèbre *Archæopteryx* (fig. 76), se rencontre avec des lézards volants, les ptérodactyles (fig. 77), avec des sauriens, des dinosauriens bipèdes, des crocodiliens et les premières tortues.

1. Voir plus haut, p. 57.

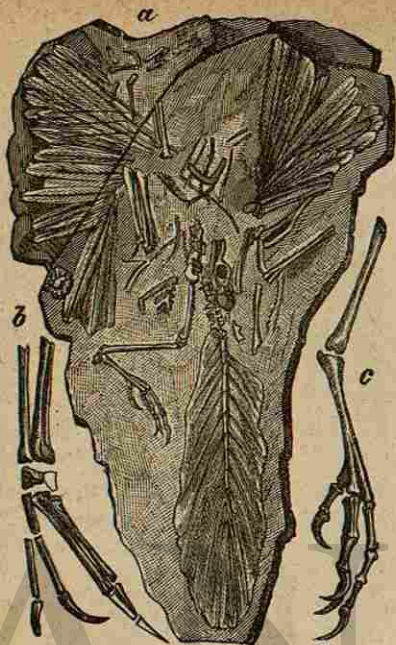


Fig. 76. — *Archæopteryx lithographica*. a, plaque dérite par Owen; b, aile; c, patte.



Fig. 77. — *Pterodactylus elegans*.
DE LAPPARENT. — ABRÉGÉ. 2° édit.



Fig. 78. — *Ammonites* (*Stephanoceras*) *macrocephalus*.

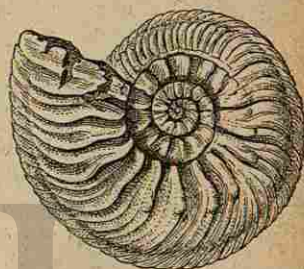


Fig. 79. — *Ammonites* (*Amaltheus*) *cordatus*.

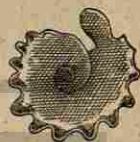


Fig. 80. — *Ammonites* (*Harpoceras*) *crenatus*.



Fig. 81. — *Ammonites* (*Neumayria*) *trachynotus*.

Les ammonites (fig. 78 à 81) et les bélemnites (fig. 82) continuent à être abondamment représentées, ainsi que les huitres, gryphées

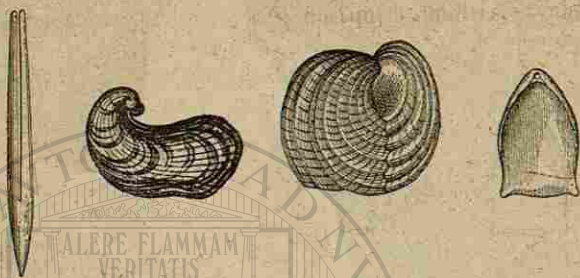


Fig. 82. — *Belemnites hastatus*.

Fig. 83. — *Exogyra virgula*.

Fig. 84. — *Rhynchonella decorata*.

Fig. 85. — *Terebratula (Waltheimia) digona*.

ou exogyres (fig. 83), les pernes, les pholadomyes, les rhynchonelles (fig. 84), les térébratules (fig. 85, 86). Dans les calcaires de



Fig. 86. — *Terebratula (Eudesia) cardium*.

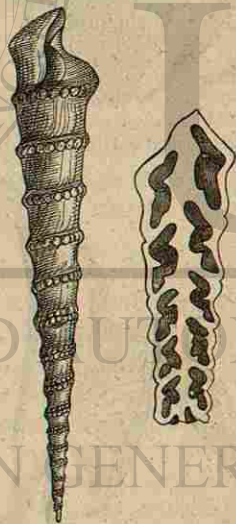


Fig. 88. — *Nerinea tuberculosa*.



Fig. 87. — *Diceras arietinum*.

récifs apparaît le genre *Diceras* (fig. 87), dont les coquilles épaisses étaient bien faites, ainsi que celles des nérinées (fig. 88), pour

ce choc des vagues, qui est une des conditions de prospérité des animaux coralligènes. Enfin les oursins (fig. 89, 90, 91) prennent, ainsi que les polypiers et les spongiaires, un remarquable essor.

Quant à la flore, elle correspond à l'apogée des cycadées, telles que *Zamites* (fig. 92), et l'on y voit apparaître les cyprès



Fig. 89. — *Echinobrius clunicularis*.



Fig. 91. — Radiole de *Cidaris florigemina*.



Fig. 92. — *Zamites Moreanus*.



Fig. 90. — *Acrosalenia spinosa*.

ainsi que les séquoïas. Mais, dans son ensemble, elle est pauvre, monotone et paraît avoir été peu appropriée à la nourriture des animaux, ce qui explique la rareté des herbivores.

Période infra-crétacée. — Au début de la période infra-crétacée, toute l'Europe septentrionale est émergée et des lacs d'eau douce occupent l'emplacement du Jura. La mer baigne seulement le sud-est de l'Espagne, le Languedoc, la Provence, la région des Alpes (à l'exception de quelques îlots) et le bassin du bas Danube. En un mot, c'est la Méditerranée actuelle, reportée vers le nord. Sur le continent règnent les *dinosauriens*, reptiles bipèdes, et, parmi eux, le gigantesque *Iguanodon* aux dents plissées (fig. 93) et à la longue queue. Bientôt la mer recommence à gagner du terrain. Cette invasion se fait sentir à la fois par le nord, c'est-à-dire sur les côtes orientales

de l'Angleterre ainsi que sur l'Allemagne, où elle submerge le Brunswick et le Hanovre, et par le sud, du côté du Jura. Au bout de quelque temps, l'ancienne cuvette jurassique du bassin de Paris se retrouve inondée; mais la mer s'avance moins loin vers l'ouest qu'aux époques précédentes, si bien qu'au sud de l'Angleterre comme en Normandie, les dépôts d'eau douce ou d'estuaire prédominent largement, alors que la Champagne et la Bourgogne voient, au contraire, l'élément marin prépondérant. A la fin de la période seulement, à cette époque *albienné*¹ que plus d'un auteur rattache au crétacé supérieur, la mer est maîtresse du terrain dans le nord, préparant, par des sédiments vaseux ou sableux, le fond sur lequel la craie va bientôt se former. Pendant ces vicissitudes, les céphalopodes continuent à être les mollusques caractéristiques des



Fig. 93. — Dent d'*Iguanodon* Mantelli.



Fig. 94. — *Belemnites* Emerici.

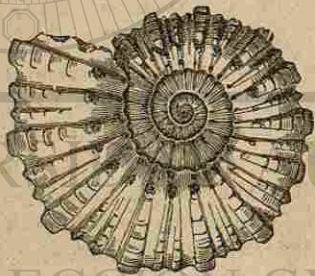


Fig. 95. — *Ammonites* (*Acanthoceras*) mamillaris.



Fig. 96. — *Ammonites* (*Hoplitites*) interruptus.

mers. Seulement le rostre des *bélemnites* tend à s'aplatir (fig. 94) et, à côté des vraies ammonites (fig. 95, 96), apparaissent les

1. Ainsi nommée du département de l'Aube.

céphalopodes à tours déroulés ou tordus, *Ancyloceras* ou *Crioceras* (fig. 97), *Hamites* (fig. 98), *Turrilites*.

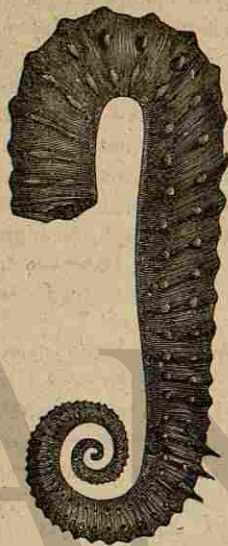


Fig. 97. — *Ancyloceras* (*Crioceras*) Malheroni.

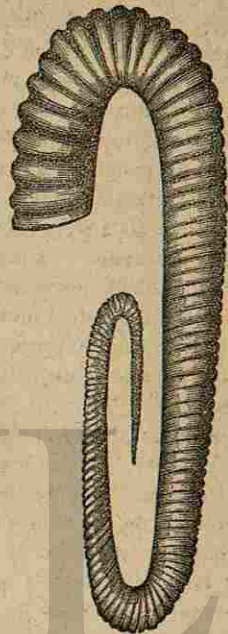


Fig. 98. — *Hamites* attenuatus.



Fig. 99. — *Requienia* (*Chama*, *Caprotina*) ammonia.

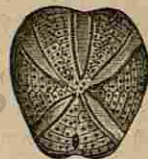


Fig. 100. — *Turraster complanatus* (*Spatangus retusus*).

Dans les régions méditerranéennes, où les calcaires construits par les organismes sont maintenant relégués, les *Diceras* juras-

siques ont fait place à des genres voisins, comme *Requienia* (fig. 99), et, plus près des côtes, abondent les oursins *spatangoides*, tels que *Toxaster* (fig. 100).

La flore infracrétacée, où dominent les cycadées et les conifères, est encore une flore jurassique. Les mêmes associations de types tropicaux avec des sapins et des cèdres s'y montrent à la fois dans l'Europe centrale et, près du pôle, au Groënland. Cependant les peupliers apparaissent dans cette dernière contrée, comme premier indice d'une différenciation des climats, qui commencerait à se prononcer dans la zone arctique.

Période crétacée. — L'invasion marine que nous venons de signaler atteint son apogée avec la période *crétacée*, qui amène dans l'hémisphère boréal non seulement le triomphe du régime marin, mais l'éclipse presque complète de la sédimentation détritique, comme si un calme absolu avait alors régné dans les mers.

Les premiers dépôts crétacés s'étendent presque partout *transgressivement*, soit sur le jurassique, soit même sur les terrains primaires. Mais de même que l'émersion du nord de l'Europe, à la fin des temps oolithiques, avait été progressive et exempte de secousses, de même le nouveau régime marin s'établit tranquillement. A peine une mince couche de grès grossier marque la base de la nouvelle série; puis la *craie* apparaît, d'abord mouchetée de petits grains verts de *glauconie*, ensuite légèrement marneuse, enfin tout à fait blanche et mêlée de lits de silex. Quand ses puissantes assises se sont déposées dans les régions du nord, une nouvelle émersion se produit, prélude des temps tertiaires, et ainsi les derniers sédiments crétacés, qui représentent un *faciès littoral*, n'occupent qu'une surface insignifiante relativement à leur *substratum* crayeux.

Pendant le même temps, dans les régions méditerranéennes, demeurées pélagiques, un nouveau mode d'activité organique a fait son apparition. Les *rudistes* proprement dits sont devenus les principaux artisans de la formation des calcaires; mais ils meurent avec la fin de la période et cèdent la place aux *foraminifères*.

La rareté des dépôts crétacés d'origine continentale explique

qu'on sache peu de chose sur les vertébrés terrestres : une telle époque devait être peu propice à l'épanouissement des mammifères. On connaît seulement, en Amérique, de grands oiseaux marcheurs, dont quelques-uns alliés aux reptiles, tels qu'*Hesperornis*



Fig. 101. — *Hesperornis regalis*.



Fig. 102. — *Belemnite nitella quadrata*.

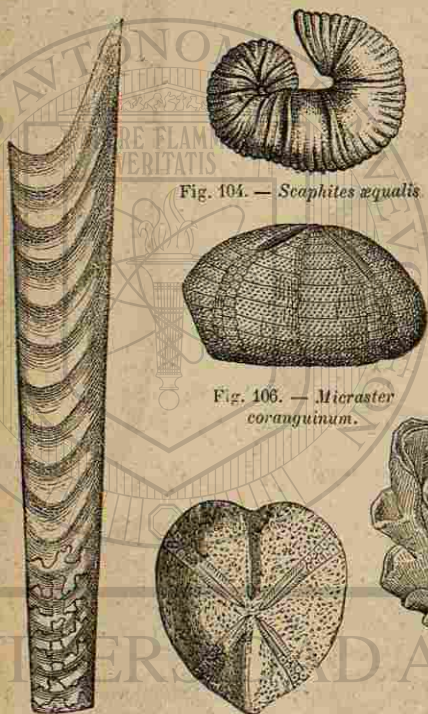
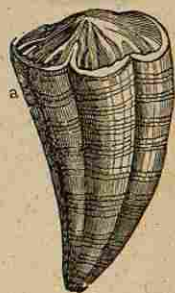


Fig. 103. — *Ammonites (Acanthoceras) rotomagensis*.

ornis (fig. 104); avec eux s'observent des dinosauriens, des crocodiliens et le grand *Mosasaurus* de Maëstricht.

Si les bélemnites (fig. 102) sont encore assez nombreuses, les ammonites (fig. 103), en dehors du début de la période, sont

sur leur déclin ; mais on observe les genres *Scaphites* (fig. 104) et *Baculites* (fig. 105). Les oursins sont nombreux dans la craie, spécialement le genre *Micraster* (fig. 106, 107). Enfin, parmi les rudistes abondent les genres *Hippurites* (fig. 108) et *Sphærolites* (fig. 109).

Fig. 104. — *Scaphites equalis*.Fig. 106. — *Micraster corauginum*.Fig. 105. — *Baculites anceps*.Fig. 107. — *Micraster cortestudinarium*.Fig. 108. — *Hippurites organisans*.Fig. 109. — *Sphærolites alatus*.

Le caractère de la flore crétacée consiste dans l'apparition définitive des plantes dicotylédones angiospermes, ou à feuilles caduques, qui annoncent le jeu des saisons. Dès lors la flore de nos contrées présente la juxtaposition de deux catégories de types, les uns destinés à disparaître ou à être refoulés vers

le sud, les autres devant former le fonds de notre végétation indigène. Ainsi les peupliers, les hêtres, les lierres, les châtaigniers et les platanes y sont associés aux palmiers, aux lauriers, aux pandanées. D'ailleurs l'ampleur presque générale des formes de la période indique un ensemble de conditions très favorable au développement du monde des plantes.

§ 2

SYSTÈME TRIASIQUE

Types et divisions du système. — Le système triasique se présente en Europe sous trois formes distinctes : 1^o un *facies pélagique* ou de haute mer, bien développé au Tyrol et dans les Alpes autrichiennes ; 2^o un *facies mixte*, dont les types existent en Franconie, en Souabe et dans les Vosges, offrant cette triple division d'où est venu le nom de *trias*, fondé sur l'intercalation d'un étage marin (*franconien*) entre deux étages d'eau douce ou de lagunes (*vosgien* à la base, *tyrolien* ou *keuper* au sommet) ; 3^o un *facies continental*, qui paraît dominer à partir des Ardennes et auquel appartient la majeure partie du *nouveau grès rouge* (*new red sandstone*) des Anglais. Les nuances vives et bariolées sont caractéristiques des sédiments du trias. Elles se retrouvent jusque dans le type pélagique du système, où les calcaires marmoréens sont souvent tachés de rouge.

Trias pélagique. — Le type pélagique du trias s'étend sur le Tyrol, le pays de Salzbourg, les Alpes vénitiennes, la Transylvanie, la Silésie méridionale, les Carpathes de la Bukowine et la Dobrudscha. La grande famille des ammonitidés y règne de la base au sommet, représentée d'abord par *Tirolites*, puis par *Ceratites*, enfin par le genre *Trachyceras*, appartenant déjà aux véritables ammonites à cloisons persiliées. Parmi les sédiments on remarque des schistes (notamment des schistes noirs à *Daonella*), des calcaires, des dolomies et des marbres bariolés, comme celui de Hallstadt, à la base duquel se trouve l'importante formation de sel gemme des environs de Salzbourg.

La dolomie forme au Tyrol des masses homogènes d'une épaisseur énorme (1000 mètres au Schlern), découpées en pics,

en aiguilles et en plates-formes abruptes qui, par leur couleur rosée et l'absence complète de végétation, impriment au paysage un caractère exceptionnel d'originalité.

Une autre particularité du trias supérieur dans le Tyrol est l'intercalation, au milieu des dolomies, de *tufs pyroxéniques*, en relation avec l'important massif éruptif de la vallée de Fassa, le plus récent parmi les centres européens d'activité interne antérieurs à l'ère tertiaire.

Type franconien et vosgien du système. — Le trias de la Souabe et de la Franconie, comme celui de la Lorraine, comprend trois termes : à la base est le *grès bigarré*, grès rouge bariolé, avec plantes terrestres et traces de *Chirotherium*, dont les premières assises, dans les Vosges, consistent en grès rouge cristallin et conglomérats à gros galets de quartz (*grès des Vosges*), tandis qu'au sommet, formé surtout de marnes bariolées rouges et vertes, se trouvent en Franconie des gîtes de sel gemme et de gypse. C'est le grès bigarré qui fournit, en Alsace et sur les bords du Rhin, ces pierres rouges faciles à tailler, si employées dans la construction des édifices.

Le *muschelkalk*, ou calcaire *conchylien*, qui vient ensuite, est une assise marine, formée d'un calcaire gris, parfois pétri d'*entroques* ou fragments cristallisés de tiges d'encrines, et dont la partie moyenne contient les gisements salifères de la Thuringe, du Wurtemberg et de la région du Neckar. Cette partie est essentiellement dolomitique et renferme, avec le sel, du gypse et de l'anhydrite (sulfate de chaux anhydre). Au *muschelkalk* succède l'étage du *Keuper* ou des *marnes irisées*. C'est un étage d'eau douce ou saumâtre, avec intercalations marines peu puissantes, et remarquable, en général, par la bigarrure et la vivacité de couleur des marnes, principalement rouges et vertes. En Allemagne, la base du *Keuper* renferme des lits de charbon schisteux dit *Lettenkohle*. En Lorraine, le milieu de l'étage est gypsifère et contient des amas lenticulaires de sel gemme, exploités à Dieuze, à Vic, à Varangéville, etc.; c'est au-dessus que s'observent en divers endroits des gîtes d'une houille très pyriteuse (Norroy).

Les grès rouges et les marnes du trias se retrouvent au Morvan et en plusieurs points de la bordure du plateau central

de la France. On les observe encore dans la région pyrénéenne ainsi qu'en Espagne.

Type continental du trias. — A l'exception d'un conglomérat, calcaire ou dolomitique, qui occupe le milieu du système et où l'on a trouvé, à Bristol, des restes de dinosauriens, tout le trias de l'Angleterre ou *nouveau grès rouge* est à l'état de marnes rouges, avec veines de gypse et de sel, et de grès bruns ou rouge-brique. Cet ensemble atteint 1300 mètres d'épaisseur dans le nord-ouest de l'Angleterre; et comme c'est là aussi qu'on y observe les plus gros cailloux de quartz, on peut penser que c'est au nord ou au nord-ouest que devait se trouver le continent qui a fourni, par sa dégradation, les matériaux des conglomérats triasiques.

Au même *facies* continental appartient, en Belgique, le poudingue de Malmédy, qui paraît dériver de l'érosion des roches dévoniennes de l'Eifel et, en France, certains conglomérats à cailloux calcaires bariolés, observés au-dessus du terrain houiller en divers points du Nord et du Pas-de-Calais.

Types divers du trias. — A l'ouest des terrains primitifs de l'Oisans, le système triasique, généralement très mince, se compose de gypse, d'anhydrite, de dolomie et de sel gemme avec grès et schistes bariolés. Dans les Alpes occidentales, la base du trias est à l'état de grès quartzeux très durs. Au-dessus viennent des calcaires magnésiens, parfois cariés et cloisonnés (*cargneules*); enfin la série se termine par les puissants dépôts de gypse et d'anhydrite, souvent imprégnés de sel, de Moutiers et de Bourg-Saint-Maurice.

Ici comme en Lorraine et en Tyrol, au rebours de ce qui se passe en Franconie, le sel est concentré dans l'étage supérieur ou tyrolien. Pour ce motif, d'Orbigny lui avait donné le nom d'étage *saliférien*.

Disons encore que si, sur la côte du Pacifique septentrional comme au Spitzberg, le trias se présente sous son *facies* pélagique alpin, dans les États-Unis de l'Est, notamment au Connecticut, on le retrouve à l'état de grès rougeâtres de formation continentale. Les végétaux de l'étage sont les mêmes que ceux du trias lorrain et les traces de reptiles labyrinthodontes s'y comptent par milliers.

En résumé, partout où le trias n'est pas exclusivement marin, sa composition témoigne d'une sorte de lutte entre la terre ferme et l'océan, dans des lagunes où le sel et le gypse venaient se concentrer et se déposer, sans doute par évaporation de l'eau de mer. En voyant les dolomies si fréquentes dans le trias, et en se souvenant qu'un calcaire, parcouru par des eaux magnésiennes, doit tendre à s'enrichir en carbonate de magnésie tandis qu'il perd du carbonate de chaux, plus soluble, on échappe difficilement à l'idée que la formation des dolomies a été l'un des phénomènes accessoires du dessèchement des lagunes triasiques; car l'eau de mer renferme toujours du chlorure de magnésium.

§ 3

SYSTÈME LIASIQUE

Divisions du système. — Le système liasique peut être divisé en cinq étages. Celui du bas, qui correspond au prélude de l'invasion marine et comprend les gisements de *bonebed* à dents de poissons et ossements de vertébrés, est l'étage *rhétien*, ainsi nommé des Alpes rhétiques. Il embrasse une partie de l'*infra-lias* des anciens auteurs. L'autre partie forme l'étage *hettangien*, dont le type a été choisi dans le grès d'Hettange, près de Luxembourg. Ensuite vient le *sinémurien*, bien caractérisé dans l'Auxois et spécialement aux environs de Semur; c'est la partie inférieure du *lias* proprement dit (ainsi nommé d'une désignation usitée en Angleterre parmi les carriers). Le système se termine par les étages *liasien*¹ et *toarcien*, ce dernier tirant son nom de Thouars en Poitou, localité où il est très fossilifère.

Bassin anglo-parisien. 1° **Étages rhétien et hettingien.** — La période liasique s'ouvre par le retour de la mer sur tout le bassin anglo-parisien. La Flandre et l'Artois, l'Ardenne, les Vosges, une petite partie du Morvan, le Plateau Central, la

1. Quelques auteurs ont substitué à ce nom celui de *charmouthien*, tiré de Charmouth (Angleterre).

Vendée, la Bretagne avec le Cotentin, le pays de Cornouailles, sont seuls émergés. Par deux larges détroits, situés l'un en Poitou, l'autre sur l'emplacement de la Côte-d'Or, la mer anglo-parisienne communique avec celles qui couvrent au même moment l'Aquitaine, la Gascogne, le Languedoc, le Jura. Entre le Hunsrück et l'Ardenne, elle envoie un golfe profond, le golfe de Luxembourg, où tous les sédiments revêtiront le facies sableux.

L'étage rhétien est représenté, principalement sur le bord oriental du bassin de Paris, par des grès (*grès infraliasique* de la Lorraine) ou des arkoses, avec quelques lits à ossements et des bancs calcaires renfermant un fossile caractéristique de l'étage, *Avicula contorta* (fig. 110). Au-dessus vient le *grès d'Hettange*, comprenant la plus grande partie du grès de Luxembourg. Mais l'hettangien cesse d'être sableux dès la Lorraine et n'est plus représenté en Bourgogne que par les calcaires connus des ouvriers sous les noms de *foie de veau* et de *lumachelle*; des minerais de fer, subordonnés à cet horizon, sont exploités à Mazonay, près du Creusot, et à Thostes, près de Semur. Le *calcaire pavé* de Saint-Amand (Berri) et la pierre à dalles de Liénesse, subordonnée à des lits d'argile avec petites gryphées, sont aussi de l'hettangien. Enfin cet étage se retrouve en Normandie, près de Valognes, sous la forme du *calcaire d'Osmanville*, exact équivalent du *lias blanc* des Anglais.



Fig. 110. — *Avicula contorta*.

2° **Lias proprement dit.** — Confondu dans le Luxembourg avec la partie supérieure du grès d'Hettange, le sinémurien prend bientôt, aux Ardennes comme en Lorraine, la forme classique du *calcaire à gryphées arquées*, l'un des termes les plus constants du système. Ce sont des bancs minces d'un calcaire gris (parfois hydraulique), alternant avec des lits argileux où abondent des gryphées. De là résultent, en général, des terres fortes et fertiles, dont l'Auxois offre le meilleur type. Cet étage a mérité, en Angleterre, le nom de *lias bleu*, à cause de sa couleur dominante. On y rencontre assez souvent des ammonites de dimensions gigantesques, ainsi que des concrétions noduleuses de phosphate de chaux.

Le liasien affecte, dans les Ardennes, la forme d'un *calcaire sableux*, exploité sur les bords de la Meuse à Mézières et à Sedan. Des bancs durs, capables de fournir des pavés, y alternent avec des assises irrégulières de sable jaune à grain fin. En Lorraine, l'étage devient une puissante assise de marnes ou de calcaire noduleux à concrétions ferrugineuses ayant la figure d'ovoides. Ce même calcaire noduleux, caractérisé par de grandes gryphées, se retrouve en Bourgogne, recouvrant les couches à ciment de Venarey et de Pouilly-en-Auxois, assez riches en bélemnites pour avoir reçu le nom de *calcaire à bélemnites*, que l'étage mérite encore dans le Calvados, aux environs de Vieux-Pont. Sur le même horizon se présentent, dans le Berri, des marnes contenant un grand nombre de petites ammonites pyriteuses et, en Angleterre, un grès marneux (*marly sandstone*).

Sur plusieurs points, notamment dans les environs d' Hirson (Aisne), et au sud-ouest de Caen, les sédiments liasiens, débordant des dépôts sinémuriens, sont venus former de petites flaques fossilifères à la surface des terrains primaires. Les plus célèbres sont celles de Maubert-Fontaine et de Fontaine-Etoupefour.

Le toarcien de la Lorraine débute par une puissante assise de marnes, dont les plaquettes sont criblées de petites bivalves dites *posidonies*. Au-dessus apparaît une couche d'*oolithe ferrugineuse* exploitée à Longwy, Villerupt, etc. Cette oolithe devient, dans les Ardennes, un calcaire simplement ferrugineux et les marnes à posidonies, très chargées de pyrite, y sont exploitées, après calcination, comme *cendres* pour l'amendement des prairies.

Moins développées dans l'Auxois qu'en Lorraine, les marnes à posidonies renferment des bancs de calcaire argileux bleu qui fournissent le *ciment* de Vassy, près d'Avallon, et alternent avec des bancs de schiste bitumineux. A cet étage appartiennent les argiles de la Caine et de Curcy (Calvados), célèbres par de grosses concrétions ou *miches*, où l'on trouve des poissons entiers renfermant parfois, dans leur cavité stomacale, les petites ammonites dont ils faisaient leur nourriture.

Le toarcien anglais est une argile bleue avec calcaire nodu-

leux et schistes contenant du *jayet*, formé aux dépens de tiges de conifères. Le rivage de la formation est facile à suivre à travers l'île de Skye et les parties avoisinantes de l'Écosse.

Types divers du système liasique. — Il ne saurait convenir de décrire ici, même sommairement, les divers types régionaux du système liasique. Nous nous contenterons donc d'en signaler les particularités les plus remarquables.

C'est à l'hettangien qu'appartient le calcaire cristallin dit *choin-bâtard* du Mont d'Or lyonnais, tandis que le minerai de fer oolithique de la Verpillière, si riche en ammonites, correspond au toarcien supérieur de la Lorraine.

Le rhétien de la Souabe abonde en lits à ossements et à coprolithes, qui ont fait donner à sa partie supérieure le nom de *cloaque*. Le lias proprement dit de cette région porte le nom de *jura noir*. C'est dans le toarcien que se rangent les schistes bitumineux de Boll (Wurtemberg), riches en ichthyosaures et où la poche à encre de céphalopodes analogues aux seiches a été souvent conservée.

En Scanie, l'étage rhétien, si peu épais partout ailleurs, atteint une puissance de plusieurs centaines de mètres et renferme d'assez nombreux végétaux terrestres ainsi que des lits de houille. Cette nouvelle manière d'être se prononce encore davantage dans l'hettangien des Carpathes, auquel appartiennent les gisements houillers de Fünfkirchen (Hongrie) et de Steierdorf (Banat). On la retrouve au Tonkin, dont les combustibles contiennent, en fait de fougères et de cycadées, des espèces connues dans la flore rhétienne d'Europe. Enfin il paraît convenable de rapporter aussi à la base du système liasique les couches à végétaux et à combustibles de Rajmahal, dans l'Inde.

Ainsi, depuis la Scanie jusqu'à la Chine, s'étendrait une bande de dépôts rhétiens ou hettangiens, formés, dans des conditions analogues à celles du terrain houiller, le long d'un continent situé au nord.

§ 4

SYSTÈME OOLITHIQUE

Étendue et divisions du système. — Le système oolithique a été étudié pour la première fois en Angleterre où ses sédiments, plus souvent détritiques que calcaires, ont comblé la cuvette dont les argiles et les marnes du lias avaient préalablement garni le fond. Dans cette contrée, le père de la stratigraphie, William Smith, a distingué dès le début de ce siècle une suite d'assises dont les noms, à peine modifiés, ont servi ensuite à désigner les étages oolithiques du continent.

Mais si les divisions anglaises s'appliquent sans difficulté à la Normandie et au Boulonnais, il n'en est plus de même lorsqu'il s'agit des sédiments de la partie orientale et méridionale du bassin de Paris. Plus on s'approche du détroit de la Côte d'Or, d'une part, de celui du Poitou, de l'autre, plus l'élément calcaire devient prépondérant, annonçant le voisinage de la haute mer. De la sorte, à côté du type *anglo-français* du nord et du nord-ouest, il y a lieu de distinguer, d'abord un type *jurassien*, ensuite un type *pélagique* ou *méditerranéen*, qui n'est bien connu que depuis quelques années.

L'histoire de ces trois régions n'a pas subi les mêmes vicissitudes. On peut cependant, en général, y reconnaître à peu près partout les étages suivants : 1° l'étage *bajocien* (de Bayeux); 2° l'étage *bathonien* (de Bath en Angleterre); 3° l'étage *oxfordien*, dont le type est l'argile d'Oxford; 4° l'étage *corallien*, pris dans son sens le plus large, c'est-à-dire comprenant, avec le *coral-rag* anglais, la plupart des constructions coralliennes oolithiques du bassin de Paris; 5° l'étage *tithonique* (*Kimmeridgien* et *portlandien* des auteurs), dont le nom, emprunté à Oppel, a été créé pour désigner la série des dépôts de haute mer qui, dans le bassin méditerranéen, terminent le système oolithique.

Angleterre, Boulonnais, Normandie. — L'*oolithe inférieure*, base du bajocien, est un calcaire rempli d'oolithes ferrugineuses, remarquablement fossilifère aux environs de Caen et de Bayeux, mais se transformant, dans le Yorkshire, en un grès

ferrugineux à grosses concrétions, dit *Dogger*¹. Le même étage est représenté au Boulonnais par des sables blancs et violacés avec lignites, directement appliqués sur le calcaire carbonifère.

La *terre à foulon* ou *fuller's earth*, qui vient ensuite, est une argile, entremêlée à Port-en-Bessin de calcaire marneux et devenant, à Caen, cette belle pierre oolithique à grain fin, avec laquelle tant d'édifices ont été construits dans le moyen âge. A Stonesfield, en Angleterre, l'étage devient schisteux et renferme des végétaux terrestres, et il en est de même dans le Yorkshire, à Scarborough, où les conditions continentales sont encore mieux accusées, notamment par des coquilles d'*Unio* (moule de rivière), ayant gardé leur situation normale.

La *grande oolithe* des environs de Bath est un calcaire jaune, fournissant une excellente pierre de taille, avec de nombreux fossiles, polypiers et gastropodes. Elle est recouverte par l'*argile de Bradford*, se transformant quelquefois en un calcaire compact dit marbre des forêts ou *forest-marble*, que surmonte un calcaire coquillier, en fines plaquettes, dont les oolithes se désagrègent à l'air et qu'on a nommé *corn-brash*.

L'*Oxford-clay* ou argile d'Oxford est une puissante assise d'argile bleue, avec lits durs (*Kelloway-rock*) à la base.

Cette argile supporte des *grès calcaires*, au milieu desquels apparaissent par places des récifs de polypiers, formés d'un calcaire caverneux dit *coral-rag*.

En Normandie, la grande oolithe et les couches qui la surmontent immédiatement sont représentées par les calcaires oolithiques fossilifères de Ranville, de Luc et de Langrune, tandis que l'oxfordien argileux forme la falaise de Dives à Deauville et que le coral-rag, encadré dans des grès calcaires, apparaît dans la ville même de Trouville, avec ses polypiers et ses oursins caractéristiques.

Sur le coral-rag repose une épaisse masse d'argile bleue dite *argile de Kimmeridge*, qui, à la Hève et dans le Boulonnais, se subdivise en assises distinctes. On observe à la base les *marnes*

1. Ce nom, devenu classique en Allemagne, y désigne le *Jura brun* ou partie inférieure du système oolithique.

à *ptéroécères*, avec bancs de pierre à ciment, formant le pied de la falaise du Hayre, puis les *argiles* et *lumachelles* à *gryphées virgules*, bien développées au cap Gris-Nez et à Boulogne. Ensuite, dans cette même région du Boulonnais, le régime sédimentaire devient plus violent; de véritables poudingues se montrent, et avec eux des argiles, entremêlées de grès et de sables, tandis qu'à Kimmeridge (Angleterre) le dépôt reste vaseux jusqu'en haut.

Les argiles à gryphées virgules appartiennent déjà à l'étage supérieur ou tithonique. Cet étage se complète par les dépôts de l'île de Portland, notamment par le *calcaire de Portland*, pierre remarquable par la finesse de son grain et qui a fourni les matériaux de Saint-Paul de Londres. Enfin les *couches de Purbeck*, qui terminent la série, sont des dépôts d'eau douce ou saumâtre, où l'on a trouvé des restes de mammifères et des souches d'arbres en place. A ce moment, l'émersion de la région anglaise était complète, ainsi d'ailleurs que celle du bassin de Paris.

Lisière orientale et méridionale du bassin de Paris.

— Tandis qu'en Angleterre et dans le nord-ouest de la France, les mers oolithiques recevaient de nombreux apports détritiques, la sédimentation mécanique avait de moins en moins d'importance à mesure qu'on s'avancait vers le sud-est. Les Ardennes forment, à cet égard, une région de transition, où les dépôts argileux gardent encore, à certains niveaux, un réel développement. Néanmoins les polypiers, qui s'essayaient timidement, en quelque sorte, dans les mers anglo-françaises, deviennent très abondants le long de l'Ardenne. Suffisamment démantelée par les érosions qui, sur son bord, avaient jeté les sédiments argileux et sableux du lias, cette région était sans doute assez aplanie pour ne plus donner grande prise aux agents extérieurs de destruction. De là, sur ses bords, un régime marin qui offrait des facilités spéciales aux organismes constructeurs. Aussi, à diverses reprises, ces derniers y édifieront-ils de puissantes assises. Mais ce caractère sera mieux marqué encore autour des Vosges et du Morvan, où abonderont, soit les calcaires directement construits par les polypiers, soit les vases calcaires résultant de la destruction progressive des constructions coralliennes.

1^o Étage bajocien. — Dès les Ardennes et surtout dès la Meuse, le terme principal du bajocien est un *calcaire à poly-piers*, dont la base prend le nom de *calcaire à entroques*, à cause de la grande quantité de lamelles calcaires brillantes, provenant de débris d'encrines, qu'elle contient. Près de Nancy ainsi qu'à Longwy, cette assise repose sur un minerai de fer hydroxydé, qu'il ne faut pas confondre avec le minerai toarcien immédiatement sous-jacent.

Le calcaire à entroques devient le trait dominant du bajocien au sud de la Lorraine, où il forme des terrasses régulières, limitées par des escarpements d'aspect ruiniforme, et qui surmontent comme autant de vieilles forteresses les talus réguliers des marnes toarciennes. Ce *facies* est particulièrement bien caractérisé dans l'Auxois. C'est aussi la plate-forme bajocienne qui constitue le remarquable promontoire connu sous le nom de Plateau de Langres.

Encore spathique, c'est-à-dire lamellaire, mais bien moins régulier dans l'est du Berri, le bajocien se transforme à l'ouest en calcaires jaunes à silex.

2^o Bathonien. — Le bathonien des Ardennes et de la Lorraine débute par des calcaires jaunes, entremêlés de lits argileux et donnant, dans les vallées de la Meuse et de la Chiers, une bonne pierre de construction. Ensuite viennent les belles masses de calcaire blanc, tantôt crayeux, tantôt oolithique, des Ardennes, que termine une couche pétrie de *Rhynchonella decorata*. Ce calcaire, évidemment d'origine corallienne, s'interrompt entre Étain et Toul, pour faire place à une formation vaseuse, qui occupe une partie des plaines de la Woëvre. Mais la *grande oolithe blanche* se retrouve au delà de Toul et devient de plus en plus compacte jusqu'à Neufchâteau. Elle est bien développée aux environs de Chaumont, en bancs épais et réguliers, surmontant des calcaires jaunâtres. Dans l'Auxois, tout le bathonien est à l'état de *calcaire marneux blanc jaunâtre*, et ce même *facies* se retrouve dans la Côte-d'Or, où cependant la partie moyenne du bathonien fournit l'excellente pierre dure de Comblanchien. En Berri, l'étage se change en une masse calcaire d'un beau grain, propre à la sculpture (pierre de Charly). Puis les calcaires blancs oolithiques reparaisent à l'ouest, donnant

les belles pierres de Vallenay, de la vallée du Cher et de celle de la Creuse, enfin et surtout les magnifiques massifs de la Vienne (pierre de Chauvigny), exploités, grâce aux conditions si favorables de leur gisement, sur une échelle grandiose.

3° **Oxfordien.** — L'oxfordien du nord-est débute par un minerai de fer argileux (minerai de Poix), que surmontent des argiles supportant soit de belles prairies, soit les parties les plus riches des forêts de l'Argonne. Ensuite vient, formant des *crêtes* escarpées, une assise siliceuse, avec grès poreux (*gaize*), qui se transforme dans la Meuse en concrétions dures dites *chailles*. Le sommet consiste en une *oolithe ferrugineuse*, exploitée à Neuvizy et à Launois, où elle est très fossilifère.

L'oxfordien diminue peu à peu d'épaisseur entre la Lorraine et le Berri, au point de se rédoire, soit à une simple couche de minerai oolithique, soit à une assise de marnes avec petites ammonites pyriteuses. Plus à l'ouest, sa base devient calcaire et se distingue mal du bathonien. Plusieurs des belles assises de pierre blanche du Poitou appartiennent au *callovien* ou base de l'oxfordien.

4° **Corallien.** — Le corallien inférieur, tout entier calcaire, atteint une grande épaisseur dans les Ardennes et la Meuse, où il se présente, non plus en massifs irréguliers de calcaire caverneux, mais en puissantes assises bien réglées, généralement oolithiques, comme les calcaires de Saint-Mihiel, de Lérouville, de Commercy, qui fournissent des pierres de taille si estimées. Au-dessus viennent des calcaires lithographiques en bancs minces réguliers, souvent avec petites bivalves dites *astartes*.

Le corallien se transforme dans la Haute-Marne, sur le passage de l'ancien détroit qui reliait le bassin de Paris à la mer du Jura. Il devient de plus en plus marneux et lithographique. A l'ouest du Morvan, à La Charité, les oolithes y reparaissent un moment. Mais, dans le Berri, le *facies* vaseux reprend, tandis que les oolithes se transportent à la partie supérieure de l'étage, donnant la pierre blanche coralligène du Château, près de Bourges. Le même fait s'était déjà produit dans l'Yonne, où la pierre de Tonnerre appartient à cet horizon supérieur. Ainsi, vers le sud-ouest, les constructions coralliennes se sont manifestées plus tard qu'en Lorraine. Mais leur apparition n'a été

que passagère et l'on voit reparaître au-dessus, terminant le corallien, de nouveaux calcaires lithographiques, faciles à confondre avec ceux qui supportent le calcaire du Château et qui constituent les plaines uniformes des environs de Châteauroux. Des marnes avec *spongiaires* séparent ces calcaires inférieurs de l'oxfordien, rappelant un *facies* encore plus développé en Franche-Comté et en Argovie.

En résumé, dans l'étage que nous avons appelé *corallien*, les calcaires construits par les polypiers se montrent à diverses reprises sur la bordure du bassin de Paris. Mais, comme on devait s'y attendre, ils n'y sont pas continus et leur rencontre dépend de la distance du point considéré aux anciens rivages, comme aussi du régime de la mer dans ces parages. C'est ainsi qu'ils font défaut sur l'emplacement du détroit qui séparait alors le Morvan des Vosges et où les courants n'ont permis que le régime vaseux.

5° **Étage tithonique.** — Des marnes ou des argiles remplies d'*Exogyra virgula* inaugurent l'étage tithonique dans les Ardennes et dans la Meuse. Ainsi les sédiments détritiques ont repris le dessus à cette époque, mais sans exclusion de fréquents retours de calcaire lithographique. A ce moment d'ailleurs, l'étendue de la mer anglo-parisienne se restreint de plus en plus et, pour trouver des couches supérieures aux *marnes virguliennes*, il faut pénétrer dans le Barrois. Ces couches sont des lits calcaires réguliers, mais peu épais, avec feuillets marneux intercalés, qui forment, sur plus de 100 mètres, les *calcaires lithographiques du Barrois* (*portlandien* inférieur des anciens auteurs). Dans le haut, ces calcaires deviennent caverneux, cariés, et près du point où ils vont disparaître définitivement sous les sédiments infracrétacés, on trouve à leur partie supérieure une oolithe jaunâtre dite *vacuolaire* (pierre de Chevillon et de Savonnières), qui seule peut correspondre à l'oolithe de Portland des Anglais.

Région du Jura. — Comme en Lorraine, le bajocien du Jura débute par une *oolithe ferrugineuse*, exploitée à Ougney et supportant un *calcaire à entroques* qui joue, en Franche-Comté, le même rôle orographique qu'en Bourgogne. Mais le bathonien inférieur est à l'état de marnes avec petites huitres (marnes de

Vesoul ou *vésuliennes*). Quant à la grande oolithe, souvent qualifiée de *forest-marble* par les géologues franc-comtois, elle est blanche, compacte et se termine par des plaquettes calcaires à éléments cristallins (*dalle nacrée* de Thurmann.)

L'oxfordien est constitué par des marnes à ammonites pyriformes, ainsi que par des calcaires argileux hydrauliques à *chailles* (concrétions siliceuses qui souvent renferment des articles de crustacés). Vu la prédominance des éléments argileux, l'oxfordien a moins bien résisté à l'érosion que les calcaires bathoniens et coralliens, entre lesquels il est intercalé. Aussi de nombreuses dépressions ou *combes* y sont-elles creusées, dominées à droite et à gauche par des *crêts* ou crêtes en calcaire corallien. Ces combes sont occupées par des prairies et le sommet de l'oxfordien sert de surface d'émergence pour des sources, qui réunissent le produit des infiltrations ayant circulé à travers les calcaires.

Dans le Jura français et argovien, le corallien inférieur ne se distingue pas minéralogiquement de l'oxfordien. Les marnes à spongiaires y sont fréquentes et les calcaires oolithiques à polypiers n'y apparaissent qu'à un niveau plus élevé que celui du corallien oolithique de la Lorraine. En revanche, le *facies* oolithique envahit la partie supérieure de l'étage, et de beaux récifs de pierre blanche à grain fin, avec des genres particuliers de dicérates, se montrent aux environs de Saint-Claude (Valfin, Oyonnax) et de Nantua (Charix), atteignant une ampleur particulière sur les bords du Rhône, dans la cluse de Pierre-Châtel. Des récifs du même âge ou à peu près, devenus des marbres rosés, donnent les pierres de Saint-Yllie et de Damparis, près de Dôle. Quelques lits à oolithes apparaissent aussi dans le tithonique, surmontés par des *dolomies*, et celles-ci, à leur tour, sont couronnées en quelques points par des marnes et calcaires lacustres à fossiles d'eau douce, correspondant au *Purbeck* anglais. Ainsi, comme à l'époque du trias, les dolomies ou calcaires magnésiens semblent annoncer l'émersion du massif jurassien. Cette émigration était un fait accompli à la fin de la période oolithique. Mais la mer n'était pas loin et allait bientôt reprendre possession de son ancien domaine.

Type méditerranéen du système oolithique. — A peine a-

t-on dépassé le Jura qu'on atteint les régions où les mers oolithiques étaient largement ouvertes. Si ce changement ne se traduit pas d'une manière très manifeste sur les sédiments inférieurs au corallien, du moins, à partir de ce dernier étage, observe-t-on une notable modification dans la manière d'être des assises. Le corallien est tout entier pélagique et se termine par une zone de calcaires marneux, célèbre sous le nom de zone à *Ammonites tenuilobatus*. Le tithonique, qui le recouvre, commence par montrer, au Salève près de Genève, à l'Échaillon près de Grenoble, dans l'Hérault à Ganges, des calcaires blancs coralligènes. Mais plus loin de l'ancien rivage, il n'y a plus que des schistes marneux contenant des *Aptychus* (fig. 111),

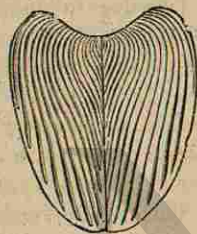


Fig. 111. — *Aptychus*.

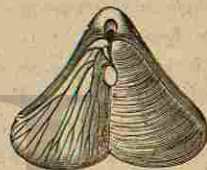


Fig. 112. — *Terebratula (Pygope) diphya*.

c'est-à-dire des organes internes d'ammonites, ou des calcaires compacts, avec un type particulier de térébratules perforées (fig. 112), *Terebratula diphya*, *T. janitor*. Ce sont, par exemple, les calcaires compacts de la Porte de France à Grenoble. Tout à fait au sommet viennent les calcaires et marnes de Berrias (Ardèche), à *Terebratula diphyaoides*, équivalent marin des couches de Purbeck et devenant, à Grenoble, les calcaires à ciment de la Porte de France.

Le type pélagique des calcaires à *Diphya* se retrouve en Italie, dans l'Espagne méridionale, en Sicile et dans les Carpathes, où par places on y rencontre des calcaires à nérinées et à polypiers (Rogoznik, Stramberg). Mais souvent aussi les fossiles font défaut et on ne trouve plus que des calcaires marmoréens à silex.

Les calcaires tithoniques des Carpathes se présentent, par

suite de dislocations, déchiqtés en récifs (*Klippen*), ce qui leur a fait donner le nom de *Klippenkalk*.

Recul des récifs oolithiques. — Le recul vers le sud des constructions coralliennes est un fait sur lequel il convient de s'arrêter un instant. A l'époque du *coral-rag* proprement dit, il y avait des récifs jusqu'en Angleterre. Un peu plus tard, on voit les calcaires coralligènes à *Diceras arietinum* se développer surtout en Lorraine et dans le Jura septentrional. Puis les récifs se transportent au sud à l'époque qui correspond aux calcaires de Tonnerre et de Bourges. Mais bientôt il n'y a plus, dans ces régions, que de faibles traces oolithiques dans le corallien supérieur, tandis qu'au même moment s'élèvent les beaux récifs du Bugey. Enfin, quand l'époque tithonique est ouverte, c'est dans le Languedoc, le Dauphiné et la Provence, jusqu'alors dépourvus de constructions coralliennes, qu'il faut en aller chercher.

A ne considérer que cet ensemble de faits, on pourrait croire que, pendant la fin de l'époque oolithique, la zone tropicale avait progressivement diminué de largeur. Mais si l'on réfléchit qu'il existe, en Wurtemberg et en Bavière, des récifs contemporains de celui de Valfin, il paraîtra beaucoup plus probable que la cause du recul des coraux doit être cherchée dans l'émersion progressive de l'Europe. Une telle émersion, en rejetant la mer vers le sud, ne pouvait manquer d'y repousser en même temps les polypiers constructeurs, qui toujours forment, sur le bord des continents, une frange tournée vers la pleine mer.

Types divers du système oolithique. — Il ne nous reste plus à mentionner que quelques manières d'être particulières des sédiments jurassiques en diverses contrées. Tout d'abord il convient de signaler la composition spéciale du tithonique en certains points de la Bavière et du Wurtemberg, notamment à Solenhofen. Ce sont des calcaires en fines plaquettes, où l'on trouve, dans un remarquable état de conservation, des *Archæopteryx* avec l'empreinte de leurs plumes, des ptérodactyles, des poissons, des insectes et jusqu'à des méduses. Plusieurs bancs donnent, grâce à la finesse de leur grain, une excellente pierre lithographique.

Du reste, des calcaires analogues existent en France au lac d'Armaille, près de Belley, à Cerin et à Morestel (Isère).

Le Jurassique supérieur de l'Allemagne, en raison de sa couleur dominante, a été qualifié de *Jura blanc*. On lui donne aussi le nom de *Malm*.

L'oolithe inférieure occupe, dans le nord de la Russie et de l'Asie, une surface considérable; elle est représentée par des grès et des schistes avec gisements de combustible et empreintes végétales semblables à celles de Scarborough. Parmi ces empreintes, il en est qu'on trouve identiques depuis l'Angleterre jusqu'au fond de la Sibérie et une différence de latitude de vingt degrés paraît sans influence sur la flore, partout composée des mêmes types.

Des dépôts analogues à ceux de l'Asie septentrionale existent dans l'Inde qui, à cette époque, semble avoir été séparée de l'Europe, tandis qu'elle était unie à l'Australie.

§ 5

SYSTÈME INFRACRÉTACÉ

Divisions du système. — Le système *infracrétacé*, dans les régions où il est entièrement marin, offre une intéressante succession de faunes, qui motive sa division en trois étages au moins. L'étage inférieur ou *néocomien* (ainsi nommé de Neuchâtel en Suisse) se relie intimement, par sa base, aux derniers dépôts oolithiques, si bien que, dans le Dauphiné et les Alpes méridionales, toute ligne de démarcation nette fait défaut entre les deux systèmes. C'est dans les parties supérieures du néocomien que commence le développement des céphalopodes à tours déroulés, qui bientôt deviennent prépondérants, pendant qu'un retour des conditions coralligènes amène, en certains points, le dépôt de calcaires blancs à *requièniens*. Cette seconde époque comprend les étages *urgonien*¹ et *aptien*² de d'Orbigny, qu'il convient probablement de réunir en une seule division *urgo-aptienne*. Enfin la troisième époque, dite *albienne*, corres-

1. D'Orgon (Vaucluse).

2. D'Apt.

pond au retour de la mer sur les régions du nord et sa faune, suivant les groupes organiques qu'on envisage, peut être rattachée aussi bien à ce qui précède qu'à ce qui suit. Nous maintiendrons l'albien dans le système infracrétacé, pour n'avoir, dans le crétacé proprement dit, que les dépôts correspondant à cette phase de calme océanique que caractérise si bien la formation de la craie.

Type pélagique du système. — Le type pélagique du système infracrétacé, qui embrasse toute la région méditerranéenne et commence à se manifester, en France, dès le Dauphiné, comprend, à la base, des marnes à bélemnites plates, des calcaires marneux et compacts, enfin, des couches à petites ammonites ferrugineuses, formant le néocomien proprement dit. Au-dessus apparaissent les *calcaires à criocères*, donnant la chaux hydraulique de Cruas et du Teil et sur l'horizon desquels se montrent, à Orgon et à la Grande Chartreuse, les calcaires blancs *urgoniens à requiénies* (*caprotines* des anciens auteurs), véritables récifs coralliens, ou des calcaires à silex.

A cette assise succèdent les calcaires marneux à grands criocères (*Ancyloceras*) de la Bedoule, reposant sur les marnes *aptiennes* à petites ammonites, *plicatules* et bélemnites, d'Apt et de Gargas.

A ce moment, la mer se retire au sud et l'étage albien n'est représenté, dans la région, que par des grès verts de formation littorale. C'est le gisement des *nodules phosphatés* de Clansayes et de Saint-Paul-Trois-Châteaux.

Région jurassienne. — Dans le Jura et les environs de Neuchâtel, où les conditions étaient plus littorales, la nature des sédiments est sensiblement différente. Au-dessus d'un calcaire blanc, coralligène (*valanginien* des géologues suisses), surmonté par un minerai de fer ou un calcaire roux, viennent les *marnes d'Hauterive* et les *calcaires jaunes* à spatanges ou à *Toxaster* de Neuchâtel et de Pontarlier. L'urgonien est encore à l'état de calcaires blancs à requiénies, formant les escarpements de la Perte du Rhône; mais l'aptien est à peine indiqué par des grès et des sables, et l'albien ne se révèle que par des lambeaux d'une étendue insignifiante, pincés dans des plis ou des failles du massif jurassien. Ces lambeaux et d'autres du néocomien,

préservés dans les mêmes conditions au pied de la côte Châlonnaise, suffisent pour montrer que la mer infracrétacée arrivait par le Jura dans le bassin de Paris.

Partie orientale du bassin de Paris. — Sur le bord oriental du bassin parisien, pendant l'époque infracrétacée, la mer, revenant après une émerision contemporaine des dépôts de Purbeck, a été constamment en lutte avec les eaux continentales. Aussi observe-t-on de fréquentes alternatives entre les sédiments marins et ceux d'eau douce. Dans la Haute-Marne, le système débute par une marne à ossements de tortues, laquelle supporte un minerai de fer, constitué par un grès ferrugineux caverneux ou géodique, sans fossiles. Les *calcaires à spatanges*, qui viennent ensuite, annoncent l'invasion de la mer, qui s'est avancée vers l'ouest jusqu'au Sancerrois, et qui a persisté quelque temps, déposant dans l'Aube et la Haute-Marne, à la suite des calcaires à spatanges, des argiles remplies d'huîtres (argiles *ostréennes*) et des lumachelles (marbre de Chaource). Puis le retour des conditions continentales a amené le dépôt de grès bariolés et d'*argiles panachées* de rouge et de blanc, avec minerai de fer en grains, contenant des fossiles fluviatiles. Enfin la mer aptienne a de nouveau inondé le pays, déposant des argiles bleues à *plicatules*. Des *sables verts* sont venus ensuite, s'étendant non seulement sur l'Argonne et la Champagne, mais garnissant tout le bassin de Paris et formant, grâce à leur porosité, le réservoir d'eau souterraine où viendront s'alimenter les puits artésiens de la capitale. C'est alors que les sédiments argileux du gault ont recouvert cet ensemble, et que la mer, communiquant librement avec le nord, a jeté sur les plages des Ardennes, de l'Aube, de l'Yonne, de nombreux restes d'ammonites, souvent transformés en *phosphate de chaux*. Puis les eaux se sont clarifiées et un grès argileux à ciment de silice hydratée, la *gaize*, roche poreuse avec concrétions de silex fondues dans la masse, a couvert toute l'Argonne, dans l'orographie de laquelle cette gaize se dessine aujourd'hui par sa tendance à former des crêtes escarpées.

Europe septentrionale. — Le mélange de sédiments marins et de dépôts d'eau douce, que nous avons vu se produire dès la bordure orientale du bassin de Paris, laissait prévoir qu'en

avançant encore dans la direction du nord-ouest, on verrait le régime continental prévaloir de plus en plus. C'est en effet ce qui arrive et, depuis la Normandie et l'Angleterre méridionale jusqu'au Hanovre, la partie inférieure du système infracrétacé est constituée presque exclusivement par des formations d'eau douce. Le type de ces dépôts existe en Angleterre, dans la région appelée *Weald*, ce qui fait qu'on les désigne souvent sous le nom de formations *wealdiennes*. Ce sont des sédiments de lacs, de fleuves ou d'estuaires, où dominent des sables blancs, violacés ou ferrugineux, avec débris de fougères; des grès ferrugineux parfois assez riches pour servir de minerais de fer; des argiles grises, rouges ou bariolées, souvent réfractaires, en amas et en nids plutôt qu'en couches réglées. En quelques points, des lits à fossiles marins y sont intercalés, montrant qu'il s'agit de dépôts formés dans le voisinage de la mer, alors que la principale masse du continent était située à l'ouest pour l'Angleterre et la Normandie, au nord pour la Flandre et le Hainaut, au sud pour le Hanovre.

Ce mode de sédimentation a prévalu dans toute la Normandie et jusqu'au delà du méridien de Beauvais, comme en témoignent les couches soulevées, avec argiles à poteries, du Pays de Bray. Il s'est étendu sur le Boulonnais, la Flandre et le Hainaut (où des argiles de cet âge, tombées dans une crevasse du terrain carbonifère, ont fourni une magnifique récolte de squelettes d'*Iguanodon*); enfin sur le Hanovre, où l'argile *wealdienne* abonde en *paludines*, petits mollusques d'eau douce, tandis que le grès *wealdien*, dans lequel sont intercalées des couches de combustible minéral, provenant de conifères, fournit une bonne pierre de taille.

Ce n'est que tout à fait au nord de l'Angleterre, dans les falaises de Speeton, que le facies marin apparaît dès la base du système. Mais partout, à dater de l'urgonien, des symptômes de submersion se manifestent, amenant en Angleterre et au Boulonnais le dépôt du grès vert inférieur, bientôt suivi de celui de l'argile bleue du gault, très développée et très fossilifère à Folkestone. Cette dernière se termine en Normandie par un grès argilo-siliceux ou *gaize*, identique avec la roche qu'on observe au même niveau en Argonne.

Les mêmes étages aptien et albien sont marins au Hanovre, où le gault se présente à l'état de *marnes flambées*.

§ 6

SYSTÈME CRÉTACÉ

Etendue et divisions du système. — Le système *crétacé* est bien développé dans les parties tempérées de l'hémisphère boréal, où il offre deux *facies* distincts : l'un, septentrional, caractérisé par la *craie*, roche blanche sans consistance, riche en enveloppes calcaires de globigérines; l'autre, méridional et essentiellement méditerranéen, où dominent les *rudistes*, représentants aujourd'hui éteints d'un mode d'activité organique analogue (mais nullement identique) à celui des animaux coralligènes.

Le premier étage crétacé est le *cénomanién*, ainsi nommé du Mans, où il existe à l'état de sables et de grès. Le second est le *turonien*, formé pour la craie tuffeau de Touraine. Le troisième ou *sénonién* correspond à la craie blanche de Sens et de la Champagne. Enfin un dernier étage, appelé *danien* parce que le type en a été pris au Danemark, comprend les dépôts très clairsemés dont la formation a précédé et, en quelque sorte, préparé l'avènement de l'ère tertiaire.

Bassin de Paris : 1^o Étage cénomanién. — Au début de l'époque *cénomaniénne*, la mer qui, lors du gault, ne dépassait pas vers l'ouest une ligne allant du Sancerrois à l'embouchure de la Seine, envahit jusqu'aux confins de la Bretagne. Mais tandis que les sédiments calcaires domineront dans tout le nord et l'est du bassin de Paris, un régime plus agité va provoquer le dépôt de sables depuis le Berri jusqu'aux approches de la Normandie.

Autour du Mans, ces sables, souvent ferrugineux et agglomérés en grès, se divisent en deux assises : à la base, les *sables et grès du Maine*; au sommet, les *sables du Perche*, couronnés par un cordon de *marnes blanches à ostracées*, ainsi nommées de l'abondance des huitres. En s'éloignant vers le nord-est, on voit, comme à Nogent-le-Rotrou, une assise calcaire s'intercaler d'abord entre les deux masses de sables, puis les remplacer

totalement. Dans la vallée de la basse Seine, tout l'étage n'est plus formé que d'une *craie glauconieuse*, c'est-à-dire mouchetée de points verts de *glauconie*¹ et célèbre par la couche fossilifère de la côte Sainte-Catherine à Rouen.

Si l'on continue à s'avancer vers le nord, la glauconie se concentre de plus en plus à la base du cénomaniens et le reste forme, sur les falaises du Pas-de-Calais, un massif de *marne crayeuse* (*chalky marl*) ou de *craie grise*, qui alimente les fabriques de ciment du Boulonnais. En Flandre, ces marnes deviennent de vraies argiles, bleues ou vertes (*dièves* des mineurs) et la glauconie de la base se change en un poudingue à cailloux roulés, dit *tourtia*, qui presque partout repose sur les terrains primaires, accusant l'effet de l'invasion marine sur un sol depuis longtemps émergé.

Mais à mesure qu'on s'éloigne de l'îlot ancien des Ardennes, le *facies* crayeux reparaît et le cénomaniens, superposé en concordance au gault ou à la gaize, est une craie avec ou sans silex, à moules d'ammonites, qui se poursuit jusqu'à la Loire. A peine a-t-on franchi ce fleuve que les sables commencent à se montrer à divers niveaux au milieu des marnes utilisées pour l'amendement de la Sologne, s'agglomérant à Vierzon en grès à pavés. De plus, les ostracées apparaissent au sommet, préparant le *facies* destiné à prévaloir dans l'ouest.

2° **Étage turonien.** — Encore assez variable d'un bout à l'autre du bassin, l'étage *turonien* est cependant plus homogène que le précédent et trahit un régime plus uniforme. En Touraine, c'est une craie micacée dite *tuffeau*, très facile à tailler (pierre de Bourré), qui affleure dans les vallées du Loir et du Cher, où les anciennes carrières sont devenues des habitations souterraines très caractéristiques; mais en Normandie, l'étage est formé d'une *craie marneuse à inocérames* (fig. 413), qu'on retrouve à peu près identique dans le Boulonnais et qui, presque partout, est exploitée pour la fabrication de la chaux. Les silex y sont rares, surtout au voisinage du Pas-de-Calais. Argileux dans les Ardennes, marneux en Champagne où il fournit, près

1. Autrefois confondue avec la *chlorite*, d'où le nom de *craie chloritée*.

de Valmy, de la chaux hydraulique, le *turonien* se montre de plus en plus crayeux vers le sud, jusqu'au point où il disparaît sous d'épais dépôts tertiaires, qui empêchent de le suivre entre la Loire et la basse vallée du Cher.

3° **Étage sénonien.** — L'uniformité des conditions de dépôt s'accuse plus nettement encore avec le *sénonien* qui, même au voisinage des rives du bassin, dénote par sa composition un régime marin extraordinairement calme, propice aux *globigérines*. Sauf quelques différences dans le grain de la roche, ainsi que dans le nombre et la disposition des nodules de silex, c'est partout une craie blanche, presque toujours tendre, parfois traçante, propre au marage des terres ou à la fabrication de la chaux et de l'acide carbonique pour les sucreries.

Les silex y forment des cordons horizontaux de nodules, espacés en moyenne de 1 à 2 mètres et où parfois, comme dans la vallée de la Seine, les nodules se réunissent en bancs continus. Les silex résultent de la concentration, autour de fragments de coquilles ou d'autres centres attractifs, de la matière siliceuse qui, dans l'origine, était intimement mêlée aux menus débris calcaires constituant la masse de la craie. Il est probable que cette matière siliceuse a été fournie, à la fois par des spicules d'éponges et par des algues microscopiques, de la famille des diatomées. La concentration de la silice a été l'effet d'un phénomène moléculaire analogue à celui qui, dans une pâte hétérogène qu'on abandonne à elle-même, détermine le départ des divers éléments, qu'un brassage artificiel maintenait seul en mélange intime.

Si la craie est certainement une formation de mer tranquille, il n'y a pas lieu de penser que la mer où elle s'est déposée fût très profonde. Le rôle des *globigérines* n'y était pas prépondérant. Des bryozoaires, des huîtres et des bivalves y sont associés aux foraminifères.

L'ensemble de la craie sénonienne est assez homogène pour



Fig. 413. — *Inoceramus labiatus*.

que, sans le secours de la paléontologie, il fût difficile d'y établir des subdivisions. Cette difficulté est surtout sensible en Champagne, où le sénonien et le turonien, l'un et l'autre presque dépourvus de silex, affleurent en de vastes plaines ondulées et infertiles, formant la *Champagne pouilleuse*.

On peut distinguer dans le sénonien une masse inférieure, caractérisée par les oursins du genre *Micraster*, et une masse supérieure, où apparaissent les *bélemnites*. La première est quelquefois dure et *noduleuse*, comme en Normandie et en Picardie, où l'on y extrait des pierres de taille, par exemple à Caumont, à Vernon et dans la vallée de la Noye. Les parties supérieures sont fréquemment durcies et jaunies par des infiltrations magnésiennes (Beynes, Breteuil, Villers-Carbonnel, Marle, etc.). La craie à bélemnites comprend d'abord la *craie de Reims à Bel. quadrata*, puis la *craie de Meudon à Bel. mucronata*.

Très puissante et minéralogiquement très homogène autour de Sens, la craie blanche change un peu de caractères dans le nord, où l'apparition de quelques ammonites indique une jonction avec un bassin septentrional plus largement ouvert. De même, en Touraine, le sénonien, peu épais, consiste en une craie jaune, dite *craie de Villedieu*, avec ammonites, déposée dans un détroit qui faisait communiquer le bassin de Paris avec la mer aquitaniennne.

La distribution actuelle des dépôts sénoniens ne donne qu'une idée incomplète de l'étendue de la mer où ils se sont formés. Sur de nombreux points des Ardennes, du Morvan, du Sancerrois, on rencontre des silex, souvent fossilifères, de la craie blanche. Tantôt ces silex sont épars, tantôt on les trouve en conglomérats épais, dont les matériaux n'ont subi aucun transport et proviennent de la destruction sur place, par des agents plutôt chimiques que mécaniques, d'un ancien massif crayeux. La mer sénonienne, du moins au début, a donc eu plus d'extension que les autres mers crétacées. Mais à l'époque des bélemnites, son domaine était déjà sensiblement réduit et, sur divers points de la Picardie, la composition des dépôts de cet âge marque le rétablissement des conditions littorales. Dans cette catégorie doivent être rangées les *craies phosphatées*

récemment découvertes dans l'Oise et la Somme, craies dont la destruction partielle, par des agents chimiques, a donné lieu ultérieurement à la formation des *sables phosphatés* riches de Beauval et autres localités. Ces craies sont à la base de l'assise à bélemnites.

1^{er} Étage danien. — La mer *danienne* n'a laissé, à la surface du bassin parisien, que des lambeaux épars d'un calcaire en petits grains dit *calcaire pisolithique*. On l'observe à Meudon, à Vigny, à Laversine près de Beauvais, et au Mont-Aimé, en face de Vertus. Ce calcaire, en général discordant avec la craie, ne représente que le sommet de l'étage danien. Pour en avoir la base, il faut aller dans le Cotentin, aux environs de Valognes, où affleure le *calcaire à baculites*, roche d'un blanc jaunâtre, avec ammonites et scaphites. Mais la série est complète dans le Hainaut, où la *craie de Ciply*, avec petits grains de phosphate de chaux, supporte une roche semblable au calcaire pisolithique et qui se retrouve encore mieux caractérisée au Limbourg sous la forme de *craie de Maëstricht*. C'est dans les carrières de *tuffeau* de cette localité qu'ont été recueillis les ossements du grand reptile appelé *mosasaure*.

Disons seulement qu'il n'est nullement certain que le calcaire à baculites du Cotentin et la craie de Maëstricht ne doivent pas être rattachés au sénonien. C'est, paraît-il, la conclusion à laquelle on est conduit quand on prend les zones d'ammonites pour base de la classification de la craie.

Europe septentrionale. — La craie de l'Angleterre appartient au même bassin que celle de la France du nord. On y distingue le *grès vert supérieur* (en partie), puis la craie grise et marneuse, ensuite la craie sans silex (turonien), et la craie avec silex (sénonien), sans aucune trace du danien.

Aux environs d'Aix-la-Chapelle, le sénonien devient sableux et argileux. Au delà se développe, en Westphalie et au Hanovre, un *faciès vaseux pélagique*, propre à l'Europe septentrionale et se poursuivant jusqu'en Galicie, sous la forme de marnes crayeuses avec ammonites, recouvertes au Danemark et en Scanie par la *craie danienne de Faxø*.

Mais si l'on se rapproche des massifs anciens de la Saxe et de la Bohême, on voit le cénomanienn, à l'état de grès (*Quader-*

sandstein), reposer directement sur le micaschiste, par une couche renfermant les premiers vestiges de plantes dicotylédones. Puis les marnes (*Pläner*) et les grès (*Quader*) alternent à diverses reprises dans le turonien et le sénonien de la Suisse saxonne.

Sud-ouest de la France, Pyrénées. — Dans le bassin des Charentes, la *transgressivité* de la craie s'accuse par la superposition directe du *cénomani* aux dépôts oolithiques, sans traces d'*infracrétacé*. En même temps, dès cet étage, les rudistes commencent à jouer un rôle important et certains calcaires, dits à *Ichthyosarcolithes*, sont remplis de grands moules de caprines. La Champagne charentaise est formée par le sénonien (*campanien*) bien développé dans les falaises de Talmont et de Caillau, tandis que la *craie de Royan* représente le daniien ou le sénonien tout à fait supérieur.

Une composition analogue se révèle dans les Pyrénées de la Haute-Garonne, où le sénonien supérieur et le daniien surtout présentent de l'intérêt. Ce sont d'abord les calcaires jaunes nankin de Gensac, avec hippurites et grands oursins (*Hemipneustes*), puis le *garumnien*, où des couches saumâtres alternent avec des assises marines, encore mieux développées aux environs de Tercis (Landes). Dans cette dernière localité, divers indices témoignent de l'analogie du régime des mers sénoniennes du sud-ouest avec celui de la mer Westphalienne.

Bassin de la Méditerranée. — Le crétacé méditerranéen contraste singulièrement avec celui du nord par le grand développement qu'y prennent les bancs de *rudistes* (hippurites, sphérulites, radiolites). Superposées à des calcaires *cénomaniens* à caprines, les constructions des rudistes, ou *calcaires à hippurites*, apparaissent dès le turonien (quelquefois transformées en grès rougeâtres, comme à Uchaux) et se poursuivent jusque dans le sénonien supérieur.

En outre, dès cette dernière époque, des symptômes d'émer-sion se manifestent. On observe de véritables dépôts de houille ou de lignite (bassins de Fuveau et de Piolenc). Au-dessus viennent des *argiles rutilantes*, qu'on retrouve dans le Languedoc et aussi dans les Corbières, surmontant les couches

sénoniennes à hippurites de la montagne des Cornes, près de Rennes-les-Bains.

Ainsi, à l'époque danienne, le régime pélagique abandonnait la Provence et les Pyrénées pour se reporter plus au sud, dans les péninsules méditerranéennes, où les calcaires à rudistes commencent à se mélanger de bancs à foraminifères.

Crétacé américain. — Il y aurait beaucoup à dire sur les types crétacés des régions étrangères à l'Europe. Mais nous nous contenterons de signaler la similitude du régime des mers américaines avec celui de nos contrées. Ainsi la craie proprement dite, reposant sur le trias sans intermédiaire, occupe le bassin du Mississipi, et ce n'est qu'au sud, dans le Texas, qu'on rencontre les hippurites. Celles-ci se retrouvent dans les Antilles, où le crétacé présente une analogie frappante avec celui des Alpes autrichiennes (Gosau). Cela donne à penser qu'une chaîne d'îles, sinon un continent proprement dit, unissait alors nos régions à l'Amérique et que le régime méditerranéen se poursuivait, depuis le golfe des Antilles, non seulement jusqu'en Asie Mineure, mais jusqu'aux Indes orientales.

§ 7

ÉRUPTIONS DE L'ÈRE SECONDAIRE

Éruptions proprement dites. — L'ère secondaire, dans l'Europe occidentale, a été particulièrement pauvre en manifestations de l'activité interne. Ce n'est guère qu'à l'époque triasique qu'il paraît y avoir eu de vraies éruptions. La base du trias alpin est souvent formée par un grès qui est un véritable tuf de porphyre quartzifère, et dans le Tyrol (fig. 114), des épanchements d'une *granulite à tourmaline*, d'une *syénite*, d'un *porphyre pyroxénique*, d'un *mélaphyre* et d'une *porphyrite* ont plus d'une fois interrompu le dépôt des couches du trias supérieur. De même, des nappes d'*euphotide* ou roche granitoïde à lamelles de diallage, se changeant sur les bords en *variolite*, se sont fait jour dans le trias des Alpes, et d'autres roches basiques, de couleur verte, rangées dans la catégorie des *ophites*, ont apparu à la même époque dans le massif pyrénéen.

Pendant ce temps, des nappes de *mélaphyre* se répandaient au milieu des couches triasiques des États-Unis, dans le Connecticut.

Dans l'Europe orientale, notamment en Silésie, il paraît y avoir eu quelques éruptions de roches basiques, analogues aux *diabases*, vers le milieu de l'époque crétacée. D'autres éruptions, d'âge secondaire, se sont fait jour en Crimée et en Volhynie, et c'est sans doute à la même date qu'il faut rap-

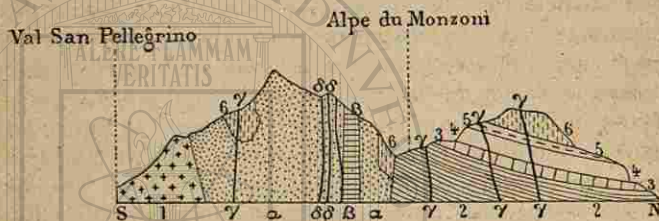


Fig. 114. — Le massif éruptif du Monzoni (Tyrol). — 1, porphyre quartzifère; 2, 3, 4, 5, 6, couches triasiques; α, syénite dite monzonite; β, porphyre pyroxénique; γ, mélaphyre; δ, porphyrite.

porter les épanchements granitoïdes, de nature *syénitique*, du Banat autrichien.

Mais c'est surtout dans les Andes de l'Amérique du Sud que l'activité éruptive semble s'être dédommée, en quelque sorte, du silence qu'elle s'imposait dans nos pays pendant les temps jurassiques et crétacés. D'énormes émissions *porphyriques*, en coulées et en nappes, partiellement sous-marines, et accompagnées de tufs fossilifères, ont eu lieu entre le 13° et le 33° degré de latitude méridionale. Il est à remarquer que des éruptions de même nature se sont produites en Afghanistan, pendant l'époque jurassique. Le néocomien y est presque entièrement constitué par des débris de ces porphyres. Comme d'ailleurs les *porphyrites* de l'État de Montana sont attribuées au jurassique et que, dans le Colorado, une masse de *porphyres* et de *porphyrites* apparaissent dans des conditions qui semblent placer leur sortie vers la fin des temps crétacés, on voit que les manifestations volcaniques sont loin d'avoir fait défaut pendant l'ère secondaire, ainsi qu'on a pu le croire

longtemps d'après les observations relatives à la France et aux pays voisins.

Phénomènes thermaux. — Postérieurement aux épanchements que nous avons signalés, il paraît y avoir eu surtout, en Europe, des phénomènes *thermaux*. Ainsi, le trias du Morvan est parcouru par de gros filons de quartz et certains sédiments liasiques ont été entièrement silicifiés par des émanations semblables. En même temps il se déposait des substances métalliques. Les mouches de *carbonate de cuivre* abondent dans le trias et l'arkose rhétienne. Parfois, la *galène* ou sulfure de plomb remplit les couches du calcaire à gryphées arquées, attestant que les filons de plomb argentifère du Morvan, comme ceux du Hartz et de la Saxe (du moins en partie), résultent d'émanations immédiatement postérieures au trias et ayant suivi les grandes éruptions primaires, à peu près comme les solfatares et les sources thermo-minérales suivent aujourd'hui les manifestations violentes du volcanisme.

CHAPITRE V

ÈRE TERTIAIRE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÈRE TERTIAIRE

Caractères généraux de l'ère tertiaire. — L'ère tertiaire ou *néozoïque* peut être définie d'un mot : c'est celle où les conditions physiques et biologiques, jusqu'alors remarquablement uniformes, se sont différenciées au point de produire la variété qui caractérise l'ère moderne. A la fin des temps crétacés, l'Europe, réduite à un petit massif central et pourvue d'un faible relief, commençait à prononcer un mouvement d'émér-

Pendant ce temps, des nappes de *mélaphyre* se répandaient au milieu des couches triasiques des États-Unis, dans le Connecticut.

Dans l'Europe orientale, notamment en Silésie, il paraît y avoir eu quelques éruptions de roches basiques, analogues aux *diabases*, vers le milieu de l'époque crétacée. D'autres éruptions, d'âge secondaire, se sont fait jour en Crimée et en Volhynie, et c'est sans doute à la même date qu'il faut rap-

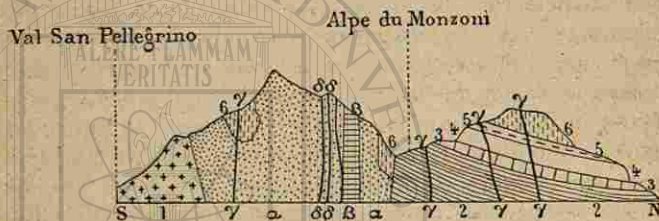


Fig. 114. — Le massif éruptif du Monzoni (Tyrol). — 1, porphyre quartzifère; 2, 3, 4, 5, 6, couches triasiques; α, syénite dite monzonite; β, porphyre pyroxénique; γ, mélaphyre; δ, porphyrite.

porter les épanchements granitoïdes, de nature *syénitique*, du Banat autrichien.

Mais c'est surtout dans les Andes de l'Amérique du Sud que l'activité éruptive semble s'être dédommée, en quelque sorte, du silence qu'elle s'imposait dans nos pays pendant les temps jurassiques et crétacés. D'énormes émissions *porphyriques*, en coulées et en nappes, partiellement sous-marines, et accompagnées de tufs fossilifères, ont eu lieu entre le 13° et le 33° degré de latitude méridionale. Il est à remarquer que des éruptions de même nature se sont produites en Afghanistan, pendant l'époque jurassique. Le néocomien y est presque entièrement constitué par des débris de ces porphyres. Comme d'ailleurs les *porphyrites* de l'État de Montana sont attribuées au jurassique et que, dans le Colorado, une masse de *porphyres* et de *porphyrites* apparaissent dans des conditions qui semblent placer leur sortie vers la fin des temps crétacés, on voit que les manifestations volcaniques sont loin d'avoir fait défaut pendant l'ère secondaire, ainsi qu'on a pu le croire

longtemps d'après les observations relatives à la France et aux pays voisins.

Phénomènes thermaux. — Postérieurement aux épanchements que nous avons signalés, il paraît y avoir eu surtout, en Europe, des phénomènes *thermaux*. Ainsi, le trias du Morvan est parcouru par de gros filons de quartz et certains sédiments liasiques ont été entièrement silicifiés par des émanations semblables. En même temps il se déposait des substances métalliques. Les mouches de *carbonate de cuivre* abondent dans le trias et l'arkose rhétienne. Parfois, la *galène* ou sulfure de plomb remplit les couches du calcaire à gryphées arquées, attestant que les filons de plomb argentifère du Morvan, comme ceux du Hartz et de la Saxe (du moins en partie), résultent d'émanations immédiatement postérieures au trias et ayant suivi les grandes éruptions primaires, à peu près comme les solfatares et les sources thermo-minérales suivent aujourd'hui les manifestations violentes du volcanisme.

CHAPITRE V

ÈRE TERTIAIRE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÈRE TERTIAIRE

Caractères généraux de l'ère tertiaire. — L'ère tertiaire ou *néozoïque* peut être définie d'un mot : c'est celle où les conditions physiques et biologiques, jusqu'alors remarquablement uniformes, se sont différenciées au point de produire la variété qui caractérise l'ère moderne. A la fin des temps crétacés, l'Europe, réduite à un petit massif central et pourvue d'un faible relief, commençait à prononcer un mouvement d'ém-

sion. A travers de nombreuses vicissitudes, ce mouvement va désormais s'accroître et les diverses phases en seront marquées par le soulèvement de hautes chaînes de montagnes. Tandis qu'au voisinage de la dépression méditerranéenne les dépôts garderont en général le caractère marin, dans les contrées septentrionales une large part sera faite à l'élément lacustre ou saumâtre, et peu à peu la mer sera rejetée dans ses limites actuelles. La zone chaude, après avoir longtemps défendu l'intégrité de son domaine, reculera tout à fait vers le sud; il suffira bientôt de la différence de latitude qui sépare la Provence de l'Angleterre pour passer d'une flore subtropicale à des forêts de conifères, en attendant que le refroidissement polaire gagne de proche en proche, et entraîne la retraite de tous les végétaux qui ne peuvent s'accommoder des longs hivers.

L'accroissement des masses continentales et la variété des conditions qu'elles offrent désormais se traduisent par un changement notable dans les faunes et les flores terrestres. On y voit apparaître cette complication organique qui caractérise le progrès physiologique, comme la division du travail est le signe du perfectionnement des civilisations matérielles. Les mammifères, longtemps atrophiés, se développent avec une vigueur extraordinaire et prennent possession du globe, tandis que le monde végétal déploie, avant l'invasion finale des froids septentrionaux, une ampleur et une diversité jusqu'alors inconnues. Le règne des gymnospermes est fini; la prépondérance appartient aux palmiers et aux arbres à feuillage caduc, dont le milieu de l'ère tertiaire verra l'apogée. Dans les mers, les céphalopodes ne jouent plus qu'un rôle restreint, les brachiopodes sont pauvrement représentés, et la famille des ammonitidés a dit son dernier mot. En revanche, les lamellibranches abondent et avec eux les gastropodes, dont le développement s'explique par le caractère littoral de la plupart des formations de l'époque aujourd'hui émergées. Dans les régions plus franchement marines, les foraminifères prospèrent, du moins au début de la période, et édifient des assises calcaires qui deviennent la forme tertiaire du régime méditerranéen, comme les bancs à rudistes en avaient été la forme secondaire. Les

faunes locales se multiplient, sous l'empire de conditions extérieures chaque jour plus diversifiées, préparant la variété des provinces zoologiques modernes.

En même temps l'activité interne, endormie en Europe pendant de longs siècles, se réveille en donnant lieu, sur toute la surface du globe, à des manifestations grandioses, dont les phénomènes volcaniques actuels ne sont plus qu'un écho très affaibli. Les anciennes fentes de l'écorce se rouvrent; de nouvelles crevasses prennent naissance, et, sur les parois des unes et des autres, les émanations internes déposent des matières diverses, où dominant l'or et l'argent. Ainsi, peu à peu, la terre se prépare pour recevoir dignement l'être qui doit régner en maître à sa surface.

Divisions de l'ère tertiaire. — L'ère tertiaire ou *néozoïque* a été divisée par Lyell en trois périodes, dites *éocène*, *miocène* et *pliocène*¹, et distinguées les unes des autres d'après la proportion des formes actuelles de coquilles que renferment leurs faunes respectives.

Le progrès des observations a conduit quelques géologues à proposer la création de nouveaux termes, tels que celui de *paléocène* pour les premiers dépôts tertiaires, et d'*oligocène* (dérivé de *oligos*, peu) pour la période de transition entre l'éocène et le miocène, empiétant à la fois sur l'une et sur l'autre. Puis on a réuni le pliocène et ce qui restait du miocène dans un seul système, sous le nom de *néogène*, en se fondant sur le changement marqué que l'ouverture de la période de la molasse a apporté dans la géographie de l'Europe.

Afin de conserver aux systèmes des valeurs à peu près équivalentes, nous nous contenterons d'ajouter aux divisions de Lyell l'étage *oligocène*, compris entre le principal soulèvement des Pyrénées et cette substitution du régime fluvial au régime lacustre qui, en France, a préparé la grande invasion de la mer de la molasse, prélude du soulèvement alpin.

1. *Éocène* vient de *eos*, aurore, et *kainos*, récent; c'est l'aurore des formes actuelles; *miocène* indique une proportion d'espèces modernes moindre (*meion*, moins) que celle du *pliocène* (*pleion*, plus).

Période éocène. — La période éocène a vu se produire les premiers efforts des continents, et en particulier de l'Europe, pour conquérir leurs dimensions et leur relief actuels. Les sédiments éocènes attestent, dès le début, la lutte de l'Océan et de la terre ferme, surtout dans les contrées du Nord, où abondent les formations d'eau douce, destinées à s'étendre de plus en plus au sud jusqu'à l'époque du soulèvement des Pyrénées.

Mais cette lutte n'a pas lieu dans le bassin de la Méditerranée, où les formations marines gardent quelque chose du caractère particulier qui distinguait cette région pendant les périodes antérieures; c'est-à-dire qu'on y voit dominer, se poursuivant sur de grandes étendues, des calcaires à la construction desquels les organismes ont pris une part notable. Seulement ce n'est plus à des dicérates ni à des rudistes que cette tâche est dévolue; c'est à de simples protozoaires et surtout aux *nummulites*, qui ont mérité d'imposer leur nom à l'ensemble du système éocène méditerranéen ou *terrain nummulitique*.

Au moment où s'ouvre la période éocène, le climat de l'Europe est tempéré plutôt que très chaud; l'hiver est encore nul ou presque nul et la végétation continentale paraît ne pas éprouver de variations sensibles entre le 40° et le 60° degré de latitude. Mais bientôt une révolution amène sur l'Europe la mer nummulitique, en bouleversant toute l'économie géographique du continent. Ce dernier revêt une physionomie africaine. Sous l'influence d'une mer chaude, touchant au tropique vers le sud, s'établit un régime de saisons sèches et brûlantes, alternant avec des saisons pluvieuses et tempérées, la température moyenne annuelle étant d'environ 23° sous la latitude de la Provence. Alors se trouve réalisée la plus grande élévation thermique que l'Europe ait connue dans les temps tertiaires. Les palmiers abondent en France, les cocotiers ou des arbres analogues prospèrent en Angleterre et les arbres à feuilles caduques semblent encore relégués sur les hauteurs, d'où ils ne descendront qu'à la fin de l'éocène. La période s'achève à peu près dans ces conditions, sans que les régions les plus voisines du pôle cessent de nourrir une végétation qui témoigne d'une moyenne annuelle supérieure d'une vingtaine de degrés

à celle que l'on constate de nos jours dans les mêmes parages.

C'est avec l'éocène que commence le développement des mammifères. Les *pachydermes* sont prépondérants et représentés par des animaux analogues aux tapirs, dont les principaux sont : à la base du système, *Coryphodon*; au milieu, *Lophiodon*;



Fig. 115. — *Cerithium lapidum*.

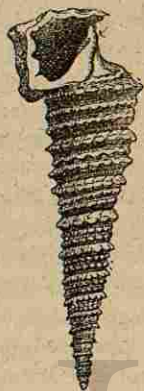


Fig. 116. — *Cerithium tricarinatum*.

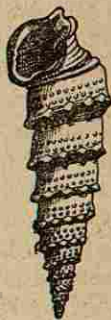


Fig. 117. — *Cerithium mutabile*.

au sommet, *Palæotherium*, l'animal du gypse parisien. Les poissons de la famille des *squales* abondent, semant leurs dents



Fig. 118. — *Turritella fasciata*.



Fig. 119. — Coupes de Nummulites dans un calcaire.

pointues dans plusieurs des dépôts de l'époque. Parmi les sédiments littoraux pullulent les individus du grand genre *Cerithium* (fig. 115, 116, 117), ainsi que les *turritelles* (fig. 118).

Enfin les plus caractéristiques des foraminifères éocènes sont les *mammulites* (fig. 119), ainsi nommées de leur ressemblance avec des pièces de monnaie et capables de constituer par leur accumulation des bancs entiers, privilège qu'elles partagent avec d'autres protozoaires, tels que les *alvéolines*, en forme de fuseaux, et les *miliolites*, semblables à des grains de millet.

Période oligocène. — La période oligocène est encadrée entre le principal soulèvement des Pyrénées et les changements géographiques qui ont inauguré la formation de la grande chaîne alpine. Ses débuts sont marqués par une invasion marine venant du nord et se faisant sentir, en France jusque dans le Gâtinais, dans la vallée du Rhin jusqu'à Bâle, tandis que, dans les régions méridionales, le domaine maritime semble plutôt reculer vers le sud. Sous l'influence de cette mer septentrionale, le climat européen devient plus tempéré et moins extrême. Les types végétaux africains et austro-indiens commencent à rétrograder, pendant que les nappes lacustres de l'éocène supérieur gagnent en étendue.

Après cette première phase, la mer se retire vers le nord et toute l'Europe, ou à peu près, devient terre ferme. C'est une époque de grands lacs, aussi bien dans la Beauce et la Limagne qu'à Manosque en Provence, près de Narbonne en Languedoc, en Savoie, en Suisse, enfin en divers points de l'Allemagne, de l'Autriche, de l'Italie et de la Grèce. En même temps l'Allemagne du Nord voit prédominer les lagunes tourbeuses, favorables à la production des lignites. L'extension des lacs et l'abondance des dépôts d'eau douce, ainsi que l'opulence des formes végétales, attestent l'humidité croissante du sol, jointe à une chaleur égale et modérée. Les arbres à feuilles caduques prennent visiblement leur essor dans cette seconde phase, sans toutefois exclure les palmiers, qui prospèrent encore au delà du 50° parallèle, ni les camphriers, dont la limite boréale dépasse le 35° degré. L'uniformité des conditions climatiques est attestée par la similitude des flores recueillies, soit sur la Baltique, par 54° de latitude nord, soit en Eubée, par 38°.

Ce qui caractérise les mammifères oligocènes, c'est la coexistence du pachyderme *Palæotherium* avec le ruminant *Anthracotherium*. Les ruminants de la période sont dépourvus de cornes

et les proboscidiens n'ont point encore paru. Parmi les mammifères nageurs, les *siréniens* tels qu'*Halitherium* sont nombreux. En outre, les dents de squales abondent dans les dépôts littoraux.

La flore oligocène étale une incomparable richesse, associant, sur l'emplacement actuel du lac de Genève, les palmiers aux lauriers, aux figuiers, aux camphriers, aux cannelliers, aux chênes, aux acacias et aux érables.

Période miocène. — La période miocène a vu s'accomplir, dans la géographie de l'ancien continent, des changements notables. Dès le début, les grands lacs de l'époque précédente se vident et les vallées fluviales se dessinent. Bientôt le relief devient plus accentué et la mer de la mollasse envahit une notable partie de l'Europe, en même temps qu'elle se répand sur l'Asie Mineure orientale jusqu'à l'Euphrate et au lac Ourmiah. Par cette mer, l'Europe est découpée en une sorte d'archipel indien, où les conditions deviennent éminemment propres à l'épanouissement du monde végétal. Aussi ce dernier, dans son ensemble, ne s'est-il jamais montré plus opulent. L'hiver est encore particulièrement doux, ne suspendant jamais d'une manière complète l'activité de la végétation et, quand la période s'achève, le camphrier garde le privilège de fleurir, dès le mois de mars, sur les bords du lac de Constance, comme il fait de nos jours à Madère. Pour retrouver les associations végétales de la période miocène, il faudrait aujourd'hui descendre de 25 à 30 degrés vers le sud. S'il y avait déjà une différence manifeste entre la végétation des terres voisines du pôle et celle de nos régions, du moins les glaces ne faisaient pas sentir leur influence et l'Islande était couverte de riches forêts. En même temps les manifestations volcaniques se multipliaient et l'Auvergne, la vallée du Rhin, la Hongrie, le versant occidental des montagnes Rocheuses et bien d'autres pays encore devenaient en même temps le théâtre de prodigieux épanchements de roches éruptives. Enfin l'écorce terrestre était partout en mouvement et ses efforts pour conquérir une situation d'équilibre finirent par dresser au milieu des airs les hautes chaînes des Alpes, des Cordillères et de l'Himalaya.

C'est dans la période miocène que les mammifères parais-

sent avoir atteint leur plus haut degré de développement. Les *proboscidiens* se manifestent avec le *mastodonte* aux dents mamelonnées et le *Dinotherium* aux puissantes défenses. Le *rhinocéros* est devenu le roi des pachydermes et les herbivores tendent à prendre une place prépondérante, grâce à l'abondante végétation de graminées que leur offrent les plages méditerranéennes.

Les cérithes, ou pour mieux dire les *potamides* (fig. 120) et les *Murex* ou rochers sont nombreux dans les dépôts coquilliers de rivage ou *faluns* de la période. Ils s'y montrent fréquem-



Fig. 120. — *Cerithium (Potamides) margaritaceum*.

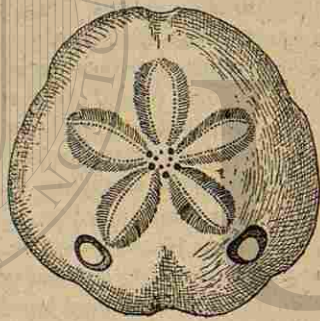


Fig. 121. — *Amphiope perspicillata*.

ment associés à des cônes, à des cyprées (porcelaines) et à des oursins aplatis tels que *Scutella* et *Amphiope* (fig. 121).

La flore miocène accuse, en Europe, une température égale, clémente durant l'hiver, pluvieuse pendant l'été. Le refroidissement de la zone tempérée ne se manifeste que par la marche envahissante des arbres à feuilles caduques, notamment des peupliers et des érables, et par la rareté plus grande des palmiers européens. Mais la proportion réellement considérable des plantes à feuilles persistantes fait voir que la nature végétale ne traversait pas, dans nos latitudes, de phases de repos complet.

Période pliocène. — La période pliocène est celle qui s'est écoulée entre le principal soulèvement des Alpes et l'avènement du régime climatérique favorable à l'établissement des grands glaciers. Assez intimement liée à l'époque actuelle, elle offre cependant une individualité distincte et représente un état de choses assez différent de celui qui prévaut de nos jours. Sans doute, vers la fin de la période, les contours des mers s'éloignaient extrêmement peu de nos rivages actuels. Toutefois, sur plus d'un point, les sédiments pliocènes sont aujourd'hui inclinés et portés à des hauteurs notables, et la faune qui les remplit, antérieure au refroidissement des régions boréales, marque plutôt la fin que l'inauguration d'une ère.

Au début de la période, la géographie des régions méditerranéennes a subi une modification passagère, mais considérable. En effet, les premiers sédiments de cet âge accusent des conditions plutôt saumâtres que marines. Des couches à *congéries*, répandues sur divers points de la Provence, de l'Italie et de la Corse, en même temps qu'elles occupent des espaces considérables dans l'Europe orientale, attestent qu'alors la Méditerranée ne s'avancait pas au delà du méridien de la Sardaigne et que toute sa partie orientale avait fait place à une série de mers caspiennes, sur les bords desquelles voyageaient librement les grands troupeaux d'herbivores. Mais bientôt le relief de la région s'accroît, la continuité du régime marin se rétablit et la mer avance, par de longues échancrures, au delà des estuaires actuels de nos fleuves, notamment dans la vallée du Rhône, où elle forme une sorte de fjord, dont le fond atteint les portes de Lyon, et dans celle du Pô, où elle pénètre jusqu'à Ivry et Mondovi. Pendant ce temps, en diverses régions de l'Europe occidentale, d'imposantes manifestations volcaniques prolongent l'activité éruptive de la période miocène. Sous ces influences, un climat relativement très doux permet à l'Europe de nourrir une végétation où les types des riches forêts du Nord sont associés à ceux des îles Canaries et des confins de la région caucasienne. Mais la température s'abaisse peu à peu, en même temps que la mer se retire; la flore s'appauvrit pour ne plus rien acquérir désormais; les espèces les plus délicates émigrent vers le sud et les

palmyers ne se trouvent plus qu'à des latitudes inférieures de 10 degrés à celles qu'ils atteignaient lors du miocène. Enfin la période s'achève avec une flore qui, assez riche encore pour fournir une abondante nourriture à de gigantesques herbivores, ne contient plus, en chaque point, d'espèces qu'il ne soit aujourd'hui facile de retrouver en descendant de quelques degrés vers l'équateur.

Au commencement du pliocène, pendant cette époque de transition que de nombreux géologues rattachent encore au miocène, la prépondérance, parmi les mammifères, appartient aux herbivores. D'innombrables troupeaux d'antilopes, de cerfs, de gazelles, parcourent les herbages qui ont momentanément remplacé une partie de la Méditerranée, où ils s'associent aux *hipparions*, précurseurs des chevaux, et aux mastodontes.

Bientôt la note caractéristique de la faune terrestre est donnée par les *éléphants*, en même temps que les *rhinocéros* et les *hippopotames* sont à leur apogée, enfin que le genre *cheval* fait son apparition.

Quant à la faune marine pliocène, ce n'est que par des nuances, souvent difficiles à saisir, qu'elle se distingue de la faune actuelle.

§ 2

SYSTÈME ÉOCÈNE

Divisions du système. — Le système *éocène* peut être partagé en deux étages. Le premier ou *suessonien*, qui tire son nom du Soissonnais, correspond dans le bassin de Paris à un régime de sédimentation *détritique*, tantôt marine, tantôt lacustre. La flore terrestre y offre des caractères assez anciens pour qu'on l'ait distinguée à part sous le nom de flore *paléocène*. Le second étage ou *parisien* comprend, avec les calcaires et les gisements de plâtre des environs de Paris, la plupart des *calcaires nummulitiques* du bassin méditerranéen. Il accuse, dans le nord, une lutte constante de l'Océan avec la terre ferme, lutte terminée par le triomphe de cette dernière. D'ail-

leurs ce triomphe, momentanément pour certaines parties, sera définitif pour la Normandie, la Picardie et la Flandre.

Bassin de Paris; 1^o étage suessonien. — La mer danienne du calcaire pisolithique, qui n'a laissé aucune trace au nord de Beauvais, paraît avoir eu pour limites le Vexin, les environs de Montereau et le bord sud-est de l'Île-de-France jusqu'à Vertus. De là sans doute elle gagnait le Hainaut par un détroit aligné du sud au nord. La première mer suessonienne couvre la Belgique, la Flandre, la Picardie, une partie de la Normandie, mais dépasse à peine le Beauvaisis, d'où elle va rejoindre, par le Soissonnais, les environs de Reims. Partout elle dépose des sables, généralement fins et glauconieux, connus sous le nom de *sables de Bracheux*, à cause des fossiles qu'ils renferment dans cette localité, située aux portes de Beauvais. Un autre gisement fossilifère du même âge est celui de Châlons-sur-Vesle, près de Reims. Dans le nord, le sable glauconieux s'agglomère souvent en *tuffeau*, ayant parfois pour base un cordon de silex verdis, qui repose directement sur la craie blanche.

Sur le bord méridional de cette mer, il se forme d'abord des dépôts lacustres, comme les *marnes blanches de Meudon* et le *calcaire de Rilly*, qui vient s'intercaler au sommet des sables de Châlons-sur-Vesle. Puis, plus loin du rivage, ce sont des *conglomérats de silex*, produits par la destruction et la dissolution de la craie. Ces conglomérats couvrent le Thimerais, une partie du Sancerrois, le Gâtinais, la Flandre orientale, etc.

Bientôt la mer tend à se retirer. Le nord, y compris la Normandie, se couvre jusqu'à Compiègne de lagunes, où les eaux marines ont accès par moments. La région parisienne est alors occupée par des étangs d'eau douce, dont les pachydermes du genre *Coryphodon* et de grands oiseaux marcheurs tels que *Gastornis* fréquentent les bords, et où se dépose l'*argile plastique*, panachée de rouge à la base, grise et mélangée de lignites au sommet. Les deux facies se soudent dans le Soissonnais; là, des lits de galets et d'huîtres alternent avec des lentilles de *travertin*, des couches d'argile et des *lignites pyriteux*, exploités comme cendres pour l'agriculture ou comme minerais de couperose et d'alun. Dans le Laonnois, des sables blancs et jaunes ou des grès s'intercalent à ce niveau, et leurs fossiles, qui sont

surtout des cyrènes, annoncent un régime saumâtre. Plus au sud, vers Montereau, l'argile plastique, plus pure et sans stratification, affecte les allures d'un dépôt de sources et s'entremêle de gros galets, formant le *poudingue de Nemours*.

C'est à la fin de cette époque que se déposent, dans les lacs ou les lagunes de la Picardie et de la Normandie, des argiles bariolées et des sables, souvent agglomérés en blocs de grès à pavés, aujourd'hui épars à la base du limon des plateaux.

Enfin, une nouvelle invasion marine submerge le nord et le nord-est, arrivant au sud jusqu'à Saint-Denis et déposant, dans tout le Soissonnais et le Laonnois, une puissante assise de sables fins, d'un gris jaunâtre, dits *sables nummulitiques*, à cause de l'abondance, dans certains lits, des petits individus de *Nummulites planulata*. Ces sables, très fossilifères à Cuise-la-Motte ainsi qu'aux environs de Laon, se reliaient à ceux qui couvrent au même moment la Flandre et la Belgique, se transformant par endroits, notamment à Ypres, en argile (*argile des Flandres*).

2° Étage parisien. — Après cette époque, tandis que les dépôts de sables, avec concrétions gréseuses, vont continuer en Belgique et en Flandre, un changement marqué se produit dans la région parisienne. La mer s'avance cette fois, au sud, un peu au delà de Paris : à l'ouest, jusqu'à Gaillon et Houdan. Elle couvre toute l'Île-de-France et va mourir sur les plaines de la Champagne.

Au début, le régime est un peu troublé dans l'ouest, comme l'atteste la couche *glauconieuse*, à petits cailloux roulés de quartz et à dents de squales, qui forme la base de l'étage là où manquent les sables nummulitiques (par exemple à Paris). Mais les eaux ne tardent pas à devenir plus calmes et le *calcaire grossier* s'y dépose, glauconieux d'abord et caractérisé par le *Cerithium giganteum*, puis pétri de foraminifères (*miliolites*) et fournissant les bancs réguliers de pierre tendre, dite *vergelé*, d'un si grand usage dans les constructions parisiennes.

Pendant ce temps, dans les parages de l'est, le régime calcaire, préparé dès le sommet des sables suessoniens, règne de bas en haut, se traduisant au début de l'étage par le dépôt des

bancs de calcaire blanc à nummulites (*pierre à liards*) du Soissonnais, pour continuer, en Champagne, par les *faluns*, si riches en coquilles, des environs de Damery.

Après la formation des couches à miliolites, des symptômes d'émersion se produisent dans la région parisienne. Un banc lacustre, dit *banc vert*, interrompt la sédimentation marine, qui reprend ensuite, mais moins franche, avec les *roches à cerithes*, remplies de petits individus de *Cerithium*, dont beaucoup sont des types saumâtres. Les *caillasses*, qui viennent par-dessus, sont des marnes et des calcaires compacts d'eau douce ou de lagunes. Le gypse, produit de l'évaporation de ces lagunes, a laissé de nombreuses traces, oblitérées sur les affleurements par la transformation des sulfates de chaux en calcaire ou en silex.

Les fossiles de cet ensemble nous apprennent qu'alors les pachydermes du genre *Lophiodon* habitaient la terre parisienne, où croissaient librement les palmiers, les lauriers et des arbres analogues aux cocotiers. Mais la mer revient encore, à peu près dans les mêmes limites, et dépose les *sables et grès de Beauchamp*, à la partie supérieure desquels le *calcaire lacustre de Saint-Ouen* et celui de Ducy annoncent de fréquentes tendances à l'émersion. Puis le bassin se transforme en lagunes que comblent ici des marnes, là d'épaisses masses de *gypse*. Au commencement, la mer y reparait par instants; mais à la fin elle s'éloigne. Les ossements du *Palæotherium*, qui fréquente les plages voisines, sont entraînés jusque dans les lagunes gypseuses, dont le comblement s'achève avec des marnes lacustres à limnées (*marnes de Pantin*). Déjà, d'ailleurs, sur plusieurs points du bassin, des *travertins* compacts ou caverneux, comme celui de Champigny, se sont substitués à la partie supérieure du gypse, attestant l'activité des sources contemporaines.

En résumé, les conditions de la sédimentation parisienne sont devenues aussi variables dans l'espace que dans le temps. Il en est ainsi, d'ailleurs, dès le début de l'étage. Par exemple, la même assise qui, dans le nord du Vexin, forme un gravier meuble à cailloux de quartz verdâtre, devient près de Mantes un calcaire glauconieux très solide, tandis qu'à Grignon c'est un sable fin, remarquable par la multitude et la belle conserva-

tion des fossiles. A Provins et aux environs, des dépôts d'eau douce occupent toute la hauteur du calcaire grossier supérieur.

Angleterre. — La même variabilité de dépôts, mais avec une proportion moindre de sédiments marins, et une complète absence d'assises calcaires, s'accuse en Angleterre, aussi bien dans le bassin de Londres que dans celui du Hampshire, auquel appartient l'île de Wight. Tandis que les sables fins et glauconieux de *Thanet* se reconnaissent facilement pour l'équivalent de ceux de Bracheux, et que les lignites du Soissonnais ont pour contemporains les sables et argiles de *Woolwich* et de *Reading*, le *London clay* ou argile de Londres est un puissant dépôt d'estuaire, synchronique des sables nummulitiques. C'est seulement par des sables, avec couches d'argile, qu'est représenté notre calcaire grossier, tandis que les sables de Beauchamp ont pour équivalent l'argile de *Barton*, célèbre par ses fossiles marins bien conservés. Enfin, à *Headon-Hill* dans l'île de Wight, on trouve des assises saumâtres, que la présence des *Palæotherium* et *Anoplotherium* rattache à notre gypse.

Il y a eu certainement, par la Manche, liaison entre le bassin tertiaire du Hampshire et les petits lambeaux du même âge qu'on observe, sur la côte française, à Dieppe d'une part, près de Montreuil-sur-Mer de l'autre.

Région méditerranéenne. — Tout autre est la condition des dépôts éocènes dans le midi, sur cette zone étendue qui comprend les Pyrénées, les Alpes, la Hongrie, le désert de Libye, la Perse et même une partie de l'Himalaya. Des calcaires et des grès pétris de nummulites, de miliolites, d'alvéolines, visibles dans les falaises de Biarritz et en Égypte, comme à 3000 mètres d'altitude dans les Pyrénées et les Alpes, attestent d'une part la submersion de toutes ces contrées et, d'autre part, l'existence d'un régime particulièrement propice au développement des foraminifères. Toutefois, ce n'est plus cette Méditerranée, si franchement pélagique, qui, depuis le trias jusqu'aux temps crétacés, abritait une population animale de haute mer. Les dépôts nummulitiques se concentrent dans des trainées, qui dessinent comme des sillons au voisinage des pays où vont bientôt se dresser les grandes chaînes de montagnes.

Sur le flanc nord des Pyrénées, le dépôt des calcaires num-

mulitiques a été suivi de la formation d'un conglomérat dit *poudingue de Palassou*, équivalent du gypse de Paris et de celui de Castelnaudary. Ce conglomérat annonce un mouvement du sol, sans doute le début du soulèvement pyrénéen, qui a eu son contre-coup dans les Alpes et les Apennins; car aux calcaires nummulitiques a succédé, dans ces contrées, un puissant ensemble de grès et de schistes, qualifié de *flysch* et sans autres fossiles que des traces d'algues. La grande Méditerranée a désormais vécu. Son bassin subira sans doute encore bien des vicissitudes; mais on n'y verra plus revenir rien de semblable aux formations qui avaient débuté par les calcaires à céphalopodes et à dicérates, pour arriver, par les calcaires à hippurites, à leur dernier terme, les calcaires nummulitiques.

Amérique. — Les mers éocènes ont laissé des traces en quelques points de la côte atlantique des États-Unis. Mais c'est dans le massif des Montagnes Rocheuses que les formations de cet âge sont particulièrement intéressantes. Là s'observe une série d'assises d'eau douce et d'eau saumâtre, connue sous le nom de *groupe de Laramie*, et où l'on constate un passage insensible entre le crétacé et le tertiaire. Il s'y trouve de nombreux dépôts de lignites, et les restes de mammifères sont étroitement liés à ceux qui, en Champagne, caractérisent la base du suessonien.

§ 3

SYSTÈME OLIGOCÈNE

Divisions du système. — Des deux étages du système oligocène, le premier ou *tongrien*, qui tire son nom de Tongres en Limbourg, correspond à l'invasion marine qui s'est fait sentir sur toute l'Europe septentrionale, amenant la mer, vers le sud, plus loin qu'elle n'avait encore pénétré depuis la fin de l'époque sénoniennne. Sans doute, cette invasion a été le contre-coup du soulèvement pyrénéen et de l'émergence provoquée par cet événement dans les contrées méridionales, où seuls le golfe de l'Aquitaine et quelques points de la Provence laissent apercevoir des dépôts marins de cet âge.

Le second étage ou *aquitaniens* marque un état de choses tout différent. La mer a quitté pour toujours les contrées du nord, où elle ne réclamera plus que d'insignifiants territoires. A la surface du continent européen, une abondante humidité entretient de grandes nappes lacustres, entourées d'une végétation luxuriante, et le soulèvement alpin est préparé par des mouvements du sol qui activent en Suisse la sédimentation, déterminant le dépôt de conglomérats et de grès tendres, dits *mollasses*, destinés à devenir encore plus caractéristiques de la période suivante.

Bassin de Paris. — L'invasion de la mer s'annonce dans le bassin de Paris par des *glaises à cyrènes*, c'est-à-dire à fossiles saumâtres, qui viennent recouvrir les marnes du gypse en les débordant au sud et sont bientôt remplacées par un dépôt de *glaises vertes* très constantes. Il est vrai que l'eau douce reprend un moment le dessus, faisant naître dans la Brie un grand lac, où se déposent, avec des marnes, des calcaires siliceux et des meulière (*meulière de la Brie*), des travertins compacts, comme le beau calcaire de Château-Landon et de Souppes, auquel se rattachent les travertins de Briare et de Cosne, sur la Loire.

Mais la mer revient de nouveau par le nord et, cette fois, atteint les confins de l'Orléanais. Sur son fond, depuis la Beauce jusqu'au delà du Soissonnais, se déposent d'abord des marnes remplies d'huîtres, niveau d'eau le plus habituel des coteaux de la campagne parisienne, ou des grès marneux fossilifères (Étrechy), gisement de la grande *Natica crassatina*. Ensuite viennent les sables de Fontainebleau, masse puissante et régulière de sables tantôt blancs, tantôt jaunes, couronnée dans le sud par une couche de grès à pavés, dont les blocs, jonchant les pentes sableuses aux environs d'Étampes et de Fontainebleau, impriment au paysage un aspect particulièrement pittoresque.

Là finit le tongrien. Des couches à *potamides* (fig. 122) fossiles d'estuaire, annoncent l'avènement du régime aquitaniens, qui s'accuse aussi par l'apparition des ossements d'*Anthraco-therium*. Un grand lac prend possession du sol : des calcaires



Fig. 122.
Potamides
Lamarckii.

ou travertins lacustres (*calcaires de la Beauce*), parfois des meulière (*meulière de Montmorency*), en tapissent le fond, enveloppant dans leur masse les restes des *planorbis*, des *limnées* et des *hélices* qui vivaient dans les eaux du lac et quelquefois ceux des mammifères des terres voisines.

France centrale. — Pendant que le lac de la Beauce couvrait la région parisienne, d'autres nappes lacustres, celles de la Limagne, du Velay, du Cantal, occupaient les dépressions du Plateau Central. Le fond de ces lacs avait commencé par se garnir, à l'époque tongrienne, d'un revêtement d'*arkoses*, résultant de la dégradation des pentes granitiques voisines. Là-dessus se déposèrent ensuite des calcaires à potamides (Issoire, Aurillac), puis des calcaires à limnées, enfin des calcaires à hélices, remplis par endroits de tubes de *phryganes*, c'est-à-dire d'étuis de larves d'insectes. Ces calcaires abondent sur certains points en ossements de mammifères, spécialement de ruminants. De grands oiseaux s'y rencontrent, au-dessus des œufs qu'ils ont dû couvrir, comme s'ils avaient été subitement asphyxiés par des émanations méphitiques.

Languedoc, Provence. — Des faits analogues se passaient dans le midi de la France. L'ancien lac d'Armissan, près de Narbonne, renferme une flore qui correspond au passage du tongrien à l'aquitaniens et accuse l'existence d'une grande forêt d'arbres résineux.

C'est au tongrien que se rapportent les gisements de gypse d'Aix en Provence, intercalés au milieu de marnes où tant de petits poissons (*Lebias*, *Smerdis*) ont laissé leurs restes, et les schistes de Cèreste (Basses-Alpes), où les plumes d'oiseaux ont été conservées à côté des poissons et des végétaux terrestres. Les lignites de Manosque sont du même âge.

La flore des gypses d'Aix atteste qu'il régnait alors en Provence une chaleur et une sécheresse assez grandes pour suspendre la végétation pendant la seconde moitié de l'été.

Aquitaine, Bretagne. — Les conditions géographiques étaient fort différentes au même moment dans le golfe de l'Aquitaine. Là se déposait un calcaire marin, le *calcaire à astéries*, où abondent les articles d'étoiles de mer. Mais tandis que le régime maritime persistait dans le Bordelais, donnant

naissance au dépôt des *faluns* ou sables coquilliers de Bazas, de Saucats, de Saint-Avit, l'Agenais disparaissait sous un lac, où se formaient des calcaires lacustres blancs et gris.

Le tongrien marin de l'Aquitaine se retrouve en Bretagne, près de Rennes, sous la forme d'un calcaire grossier à foraminifères, déposé dans un petit bassin qui devait communiquer par Nantes avec Bordeaux et Dax.

Dépôts sidérolithiques. — A l'oligocène se rapportent les curieux dépôts de *minerais de fer en grains* et de calcaire, parfois entremêlés de gypse, qui constituent le *terrain sidérolithique* du Jura, du Berri, du Poitou, etc. Ce sont des dépôts de sources, dont l'âge est fixé par leur position au-dessous d'un travertin identique avec celui de la Brie (calcaire de Saint-Florent et de la Chapelle, près de Bourges).

On y doit rattacher aussi les gisements de *phosphorite* ou phosphate de chaux concrétionné du Quercy, qui occupent, dans les calcaires jurassiques sous-jacents, des poches et des fentes souvent riches en ossements, où les genres *Palæotherium* et *Anthracotherium* se montrent associés.

Comme les minerais de fer, les phosphorites témoignent d'une grande activité thermique, qui se faisait jour sur le continent à l'époque oligocène.

Europe septentrionale. — Il nous reste à parler de l'Europe septentrionale, où le tongrien est marin et fossilifère dans le Limbourg, le bassin de Mayence et une partie de l'Allemagne du Nord. Mais depuis les bords de l'Elbe jusqu'à Cracovie, on trouve au même niveau une grande *formation lignitifère*, où le lignite résulte principalement de l'altération de conifères, qui sécrétaient de l'*ambre* ou succin, dont les fragments se retrouvent aujourd'hui disséminés au milieu de sables glauconieux sur les bords de la Baltique. Quant à l'aquitainien, lignitifère dans le massif des Sept-Montagnes, près de Bonn, il offre à Mayence un mélange de dépôts marins et dépôts d'eau douce à hélices. Tous ces symptômes indiquent un territoire en voie d'assèchement définitif.

SYSTÈME MIOCÈNE

Divisions du système. — La période *miocène* représente dans l'histoire de l'Europe une phase d'une importance exceptionnelle. C'est alors que s'est constitué le massif des Alpes, avec toutes ses dépendances, et que la Méditerranée a commencé nettement à se morceler.

Pendant une première époque dite *langhienne* (des Langhe, collines italiennes), un mouvement du sol a provoqué l'écoulement des eaux des lacs aquitaniens, et les vallées des grands fleuves actuels, tels que la Loire, ont commencé à se dessiner. Ensuite de nouvelles et plus violentes secousses, en inaugurant par de grands plissements l'époque *mollassique* ou *helvétienne*, ont ramené la mer dans l'ouest jusqu'aux portes de Blois, au centre du continent sur la majeure partie du massif alpin. C'est à ce moment que s'est formée, en Suisse, la *mollasse marine*, qui a valu à l'étage correspondant le nom d'*helvétien*. Mais à l'époque suivante, ou *tortonienne* (de Tortone en Italie), les eaux marines avaient quitté la Suisse; le massif des Alpes était, à peu de chose près, en possession de son relief définitif et si la mer occupait encore le bassin de la Hongrie, c'était avec la perspective d'une disparition prochaine, annoncée par un régime de lagunes où se formaient des dépôts de sel et de gypse.

France septentrionale. — Dès le début du miocène, sur la partie méridionale de l'ancien lac de Beauce desséché, un grand cours d'eau, esquisse de la Loire actuelle, vient verser des sables grossiers, dits *sables de l'Orléanais*. Les ossements contenus dans ces sables annoncent l'arrivée d'une nouvelle faune de mammifères terrestres, caractérisée surtout par les *proboscidiens* des genres *mastodonte* et *Dinotherium*, associés à des rhinocéros.

Le dépôt de ces sables a été suivi de celui des *sables et argiles de la Sologne*, qui couvrent, dans le bassin de la Loire, de grandes surfaces connues pour l'imperméabilité et la stérilité du sol.

Alors se produit l'invasion de la mer helvétique, qui pénètre par la vallée de la Loire jusqu'aux portes de Blois, tandis qu'un de ses bras va rejoindre la Manche par l'Ille-et-Vilaine, isolant l'Armorique devenue une île. Dans ces parages se déposent des *faluns*, c'est-à-dire des dépôts composés de coquilles plus ou moins roulées, de polypiers, de bryozoaires, etc., mélangés de sable siliceux. Les plus anciens sont les *faluns de la Touraine*, renommés pour leur richesse en fossiles (Mantuelan, Pontlevoiy). Puis viennent ceux de l'Anjou et de la Bretagne, où apparaît une huître au crochet très épais, *Ostrea crassissima*, destinée à jouer un grand rôle dans le miocène du Midi. On y remarque des dents de squales et des restes de lamantins.

Après le dépôt de ces faluns, la mer a quitté les territoires qu'elle avait envahis et si l'époque tortonienne y est représentée, c'est tout au plus par des marnes d'eau douce à hélices.

Bassin de l'Aquitaine. — Dans le golfe aquitainien, autour de Bordeaux, ce sont des faluns marins, à fossiles nombreux et bien conservés, qui représentent à la fois le langhien et la base de l'helvétien. On les observe à Léognan, à Mérignac, à Dax, à Cestas, Gabarret, etc. Puis vient la *mollasse grise* de la Chalosse, à grands oursins, après laquelle le dépôt de faluns coquilliers reprend à Salles et à Orthez. C'est encore par des faluns, mais argileux et très riches en pleurotomes, que le tortonien est représenté dans ces parages, notamment à Saubrigues.

Cette invasion marine ne s'est pas étendue très loin vers l'est. A l'époque langhienne, des lacs occupaient l'Armagnac et y déposaient les calcaires de Sansan et de Simorre, célèbres par leurs mammifères, semblables à ceux de l'Orléanais. Il est vrai qu'un peu plus tard la mer est revenue sur cette région et y a déposé jusqu'à Lectoure une *mollasse marine* à *Ostrea crassissima*, contemporaine des faluns de l'Anjou.

Bassin du Rhône, Suisse. — La mer helvétique a largement pénétré dans la vallée du Rhône et la Provence, déposant à Beaucaire et à Aix le *calcaire moellon* ou mollasse à *Ostrea crassissima*. La mollasse marine, souvent arénacée, avec un grand nombre d'huîtres et de peignes, pénètre dans le Comtat,

le Dauphiné et la Bresse, arrivant dans l'Ain jusqu'à Coligny et atteignant même le département du Jura. Dans ces diverses régions, elle offre de nombreux bancs de *poudingues*, attestant la puissance des agents d'érosion durant cette époque de mouvements du sol, qui devait se résoudre par la formation des Alpes. Souvent les galets calcaires de ces poudingues sont *impressionnés* par contact mutuel, ce qu'on attribue à un phénomène de dissolution superficielle.

C'est aussi par des *mollasses* ou grès tendres, faciles à tailler, entremêlés de poudingues et de conglomérats dits *nagelfluh*, que se caractérise le miocène de Suisse. On distingue une mollasse inférieure, marine à Bâle, d'eau douce à Lausanne et une mollasse helvétique marine, qui s'élève à Berne à une assez grande hauteur, enchevêtrée d'ailleurs avec des couches d'eau douce, ce qui atteste la lutte constante de la mer et de la terre ferme en Suisse. Le triomphe de cette dernière est complet avec le tortonien, auquel appartient la *mollasse d'eau douce supérieure*. Les grands lacs suisses étaient alors dessinés et, sur les bords de celui de Constance, à Oeningen, se déposaient des calcaires en minces plaquettes, qui ont fourni, sur la flore et la faune d'insectes de l'époque, des documents aussi nombreux que précis. Le climat de cette région devait être alors semblable à celui de Madère.

Allemagne, Autriche, Italie. — La mer miocène n'a laissé de traces en Allemagne que dans le Schleswig. Le bassin de Mayence était devenu un lac, où se déposaient des couches à *littorinelles*, avec une faune de mammifères analogue à celle de l'Orléanais, tandis que des gisements de lignite se formaient aux environs de Bonn, de Cologne, dans le Westerwald, la Wettérvie et le Vogelsgebirge, enfin sur le Mecklembourg, le Brandebourg et la Poméranie.

Pendant ce temps, le bassin du Danube, au-dessous de Vienne, continuait à être occupé par la mer et son fond se garnissait, tantôt d'une argile riche en pleurotomes (Baden), tantôt d'un calcaire (*calcaire de la Leitha*), souvent composé d'une agglomération d'algues calcaires de la famille des nulloporés. Mais l'émersion prochaine de la région se faisait déjà sentir en Galicie, en Pologne et en Transylvanie, où se dépo-

saient de riches gisements de gypse et de sel, tels que celui de Wieliczka.

Quant à l'Italie, c'est encore par des dépôts entièrement marins que le miocène y est représenté; l'un d'eux est le conglomérat de la Superga, près de Turin, où des cailloux de serpentine servent de gangue à des fossiles semblables à ceux de la Touraine. Un autre, renommé pour sa richesse en pleurotomes, est la marne argileuse bleue de Tortone.

Dans les régions encore plus franchement marines se formaient des mollasses à grands oursins dits *clypéastres*, dont il reste des traces en Corse, mais surtout en Afrique et en Égypte.

§ 5

SYSTÈME PLIOCÈNE

Divisions du système. — Le système *pliocène* peut être divisé en quatre étages. Celui de la base, ou *messinien* (de Messine), correspond à cette curieuse phase d'assèchement de la Méditerranée, ou du moins de sa partie septentrionale, qui a permis les migrations des herbivores autour des mers incomplètement salées qu'habitaient les congéries. Beaucoup d'auteurs rapportent encore cet étage au miocène, bien que ses dépôts soient séparés de ceux qui les ont précédés par une discordance marquée, fruit du principal soulèvement des Alpes. L'étage suivant, ou *plaisancien*, correspond à la nouvelle invasion marine qui a déterminé le dépôt des marnes bleues du Plaisantin et de celles des environs de Fréjus. Ensuite vient l'étage *astien*, caractérisé par le dépôt des sables de l'Astésan, de Montpellier et de la Bresse, annonçant un régime fluvial bien accentué. Enfin, avec l'étage supérieur ou *arnusien*, dont le type est fourni par les dépôts à ossements de grands éléphants du val d'Arno, en Italie, ce régime fluvial trouve son expression définitive et, tandis que le climat des contrées septentrionales offre des indices assez nets de refroidissement, les régions situées au pied des Alpes se couvrent de puissants dépôts caillouteux, résultat du creusement des vallées, dont les glaciers prendront bientôt possession.

France méridionale. — Les dépôts saumâtres du messinien ne s'observent en France que dans la vallée du Rhône, où les *couches à congéries* existent à Bollène (Vaucluse), au pied de la mollasse soulevée. Il est vraisemblable qu'on doit rapporter à la même époque (si ce n'est pas au sommet du miocène) la formation du conglomérat ossifère du mont Luberon, véritable charnier où les ossements de l'hipparion, précurseur du cheval, sont mêlés en grand nombre avec ceux des girafes, des antilopes, des gazelles, etc.

La mer plaisancienne, en même temps qu'elle déposait, près de Fréjus comme dans le Roussillon, des marnes très fossilifères, remontait la vallée du Rhône jusqu'aux portes de Lyon. Puis le régime saumâtre reprenait le dessus avec des sables et marnes à *Potamides Basteroti*.

Au début de l'astien, la mer se retire (sauf à Cannes et à Montpellier) et il se forme, dans le Valentinois comme dans la Bresse, des marnes lacustres à hélices et paludines (*marnes d'Hauterives*), que couronnent des sables fluviaux à mastodontes (*Mastodon Arvernensis*).

Enfin un mouvement du sol, sans doute celui qui a donné aux Alpes leur dernier relief, imprimé aux agents d'érosion une activité particulière. Tandis que de puissants deltas torrentiels, tels que celui du Var, se forment au débouché des cours d'eau violents de la côte ligurienne, la Bresse se couvre de cailloutis ou *alluvions anciennes*, contenant par places de très gros galets de quartzites, originaires comme les autres matériaux de la chaîne alpine qui, après avoir été élevée dans les airs, est en train de se découper en vallées profondes jusqu'au cœur du massif.

Les marnes à paludines se sont étendues dans la vallée de la Saône jusqu'à Auxonne, et les dernières phases du pliocène sont représentées dans la même vallée par des graviers à mastodontes et à éléphants, arrivant jusqu'aux environs de Dijon. Des graviers analogues, plus ou moins entremêlés de dépôts volcaniques et glaciaires, s'observent dans la Limagne, à Perrier, près d'Issoire, où ils sont riches en ossements de mammifères. Partout donc les vallées actuelles étaient en pleine voie de creusement. De plus, le caractère nettement morainique du

pliocène supérieur de Perrier atteste que déjà, à cette époque, les neiges avaient pris possession des sommets et envoyaient des courants de glace dans les gorges déjà creusées.

Europe septentrionale. — La mer pliocène empiétait un peu, en Angleterre, sur la côte de Norfolk et de Suffolk, tandis qu'en Belgique elle occupait l'estuaire de l'Escaut. Dans ces deux contrées, elle a formé des dépôts coquilliers connus sous le nom de *crag*. Seul, le *crag noir* d'Anvers correspond au messinien, tandis que le *crag corallin* d'Angleterre, abondant en bryozoaires (longtemps confondus avec des corallines ou algues calcaires), représente le plaisancien. Quant à l'astien, il peut réclamer le *crag rouge* d'Angleterre, le *crag fluviomarine* à mammifères de Norwich et les sables supérieurs d'Anvers, extraordinairement riches en ossements de cétacés.

Enfin, en Angleterre, à la hauteur de l'arnusien, se présente une couche à débris végétaux, célèbre sous le nom de *forest-bed*, et contenant des restes d'éléphants, de rhinocéros, d'hippopotames, etc., identiques avec ceux du continent. On peut paralléliser cette couche avec les graviers à *Elephas meridionalis* de Saint-Priest, près de Chartres. Bien que la flore du *forest-bed* soit tempérée et composée, en majeure partie, d'espèces qui ont émigré depuis vers le sud, elle atteste qu'à cette époque la végétation anglaise différait sensiblement de celle du midi de la France.

Quelques dépôts pliocènes s'observent dans le Cotentin ainsi qu'en Bretagne. Dans la première de ces deux régions, le pliocène garnit l'ancien golfe de Valognes, et spécialement l'estuaire de la rivière de la Douve. On y trouve des sables à buccins, surmontant un conglomérat où abondent, au milieu de galets, les os de vertébrés marins empruntés aux faluns, notamment ceux des siréniens du genre *Halitherium*. En Bretagne, c'est surtout dans l'estuaire de la Loire que se rencontrent les traces du pliocène, d'ailleurs très morcelées aujourd'hui.

On ne connaît pas de dépôts pliocènes sur les côtes occidentales des îles Britanniques, et comme il n'y en a pas non plus sur la côte orientale des États-Unis, on en peut inférer que la forme actuelle de l'Atlantique septentrional est de date très récente. Cette conclusion est d'autant plus probable qu'en

comparant la faune tertiaire des Antilles avec celle de la Méditerranée, on constate une telle analogie qu'il faut admettre à cette époque, entre les deux bassins, une communication à peu près continue, le long d'une chaîne d'îles ou d'un continent, qui auraient disparu depuis, faisant naître ou tout au moins agrandissant la dépression du nord de l'Atlantique.

Régions méditerranéennes. — Tandis que le messinien est marin en Sicile, il est représenté, dans la partie septentrionale des régions méditerranéennes, par des dépôts saumâtres à petits cérites, formant l'étage *sarmatique* des géologues autrichiens. Ces dépôts préparent la transformation de la contrée en une série de grands lacs plus ou moins salés, où se développe une faune spéciale, caractérisée par les *congéries*. Les couches à congéries (formation *pontique* de quelques auteurs) couvrent le bassin de Vienne, la Pannonie, la Galicie, la Valachie, les alentours de la Caspienne. On les trouve en Italie, où elles forment le terrain *sulfogypseux* du Livournais. Comme dans le bassin du Rhône, elles se montrent associées ou superposées à des brèches à ossements de mammifères, dont la plus connue est celle de Pikermi (Attique), renfermant la même faune que celle du mont Luberon.

Après cette époque et pendant le dépôt des marnes marines du Plaisantin, du Bolonais et du Vatican, l'assèchement des régions orientales s'accuse par le dépôt des *argiles à paludines* de la Croatie et de l'Esclavonie, bientôt suivi par celui des couches à *vivipares* de la Roumanie, contemporaines des sables jaunes marins de l'Astésan. Alors, tandis que la mer rentre dans ses limites actuelles, le val d'Arno voit se former des graviers fluviatiles à ossements d'*Elephas meridionalis*. Déjà le régime fluvial avait commencé en Autriche, immédiatement après le dépôt des couches à congéries, déposant, à Vienne, les *graviers du Belvédère*, dont la faune paraît être celle de Pikermi; c'est-à-dire qu'elle est caractérisée par les herbivores. Le développement de ces animaux était alors singulièrement favorisé, tant par le climat que par la transformation survenue dans le régime de la Méditerranée.

ÉRUPTIONS DE L'ÈRE TERTIAIRE

Premières éruptions tertiaires. — Après avoir sommeillé, dans notre Europe, pendant presque toute la durée des temps secondaires, l'activité interne s'est réveillée avec l'ère tertiaire. Dès le début, elle s'est manifestée dans la grande zone méditerranéenne et notamment en Inde, où des épanchements *basaltiques* ont couvert, dans le Dekkan, une surface considérable, entremêlant leurs nappes avec des dépôts lacustres, qui établissent le passage du crétacé à l'éocène. Ensuite les éruptions se sont produites en Occident, sous la forme de *basaltes* intercalés, dans le Vicentin, au milieu de l'éocène supérieur. On pense qu'il convient de rapporter à la même époque la sortie des *euphotides* et des *serpentes* de Toscane, de Ligurie et d'Émilie, ainsi que plusieurs des émissions d'*ophites* des Pyrénées. C'est aussi à ce moment que se seraient fait jour les *granites* récents de l'île d'Elbe, du Portugal et de la côte de Tunisie. Ces roches, qui semblent indiquer un effort des masses acides pour reproduire les types granitiques des premiers âges, sont des *granulites* ou des *micro-granulites*, se rapprochant des trachytes par l'état vitreux de leur feldspath.

Auvergne. — La grande phase d'activité des éruptions tertiaires est la période qui va du miocène à la fin du pliocène, c'est-à-dire qu'elle coïncide avec les mouvements du sol qui ont produit la chaîne des Alpes.

Ce sont d'abord des *basaltes* qui, en Auvergne comme dans les provinces rhénanes, se font jour dès le miocène. Puis se dessinent les remarquables centres volcaniques du Cantal et du mont Dore. Le premier, après de grandes éruptions d'*andésite* et de *brèche andésitique*, avec projections de *cinérites*, répand autour de lui un véritable déluge de *basalte*, qui déborde partout sur les schistes cristallins, engendrant les plateaux de Mauriac et de la Planèze.

Au mont Dore, la série a débuté par des *cinérites*, comme celles de la Bourboule, avec quelques coulées discontinues de

trachyte et de *phonolite*. Alors s'est épanché, terminant le pliocène inférieur, un *basalte* porphyroïde ou à grands cristaux, celui de Pardines près d'Issoire. A ce moment, des dislocations importantes se sont produites et une nouvelle pluie de *cinérites* a précédé les grandes coulées de *trachytes*, d'*andésites* et de *phonolites* de la région. Puis, dans les vallées déjà en grande partie creusées, et parsemées de graviers qui contenaient la faune à mastodontes du pliocène moyen, des glaciers sont descendus, datant du pliocène supérieur et donnant naissance à des brèches comme celle de Perrier. Après quoi le pliocène a été clos par la sortie d'un *basalte* qui correspond à celui des plateaux du Cantal. Mais les éruptions ne sont pas pour cela terminées et on les verra se poursuivre pendant les temps quaternaires, pour édifier les cônes volcaniques de la chaîne du Puy de Dôme.

Dans le Velay, d'importantes éruptions de *phonolites* se sont produites lors du pliocène moyen; puis sont venues des coulées d'un *basalte* sans feldspath, ou *limburgite*, auxquelles sont subordonnées les célèbres brèches ignées du Puy. Le tout a été recouvert par des tufs de projection, de l'époque du pliocène supérieur, précédant la sortie d'un *basalte* contemporain de celui des plateaux du Cantal. Une nouvelle coulée basaltique, celle de la Denise, est alors venue former le fond sur lequel se sont étalés les graviers quaternaires.

Les appareils volcaniques qui ont produit ces éruptions tertiaires sont aujourd'hui oblitérés, l'érosion pluviale et glaciaire ayant eu un long temps à sa disposition pour faire disparaître les cratères et les cônes de débris. Ce n'est que parmi les derniers basaltes du pliocène supérieur que l'on parvient encore à retrouver des cratères à demi conservés.

Allemagne, Hongrie, Italie. — Pendant la sortie des premiers basaltes d'Auvergne, la région des Sept-Montagnes, sur le Rhin, a rejeté des *trachytes* et des *andésites*, précédés et suivis par des *basaltes*.

En Hongrie et en Transylvanie, les éruptions qui ont amené la sortie des *andésites à pyroxène* sont un peu plus anciennes et datent de l'oligocène. Elles ont été suivies par des épanchements miocènes d'*andésites à amphibole*. Enfin au pliocène

appartiendraient les *rhyolites* de la contrée, roches très acides, parfois porphyriques et vacuolaires (*porphyres molaires*), parfois sphérolithiques, en petits globules brillants (*perlites*).

Ainsi, d'une manière générale, on peut dire que l'activité volcanique a été continue depuis le début de l'ère tertiaire jusqu'à nos jours. A mesure que le continent européen se dessinait, les manifestations éruptives étaient de plus en plus rejetées vers les rivages de la Méditerranée, où elles sont de nos jours exclusivement concentrées.

CHAPITRE VI

ÈRE MODERNE OU QUATERNAIRE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉPOQUE QUATERNAIRE

Définition de l'époque quaternaire. — La partie de l'ère moderne qu'on a désignée sous le nom d'*époque quaternaire* (*postpliocène* et *pleistocène* de Lyell) est caractérisée par l'apparition de l'homme sur le globe.

Depuis que ce grand fait s'est produit, la géographie terrestre paraît, au moins dans nos contrées, n'avoir subi que des changements peu considérables. Le monde organique ne s'est enrichi d'aucune espèce nouvelle; mais plusieurs formes ont disparu parmi celles qui faisaient cortège aux premiers hommes, et les grands mammifères herbivores, déjà sur leur déclin vers la fin de la période pliocène, ont vu leurs principaux représentants quitter peu à peu la scène du monde ou se retirer dans les régions méridionales.

Il semblerait donc que l'étude de l'époque quaternaire ne dût pas être séparée de celle des phénomènes actuels, si cette phase de l'histoire du globe n'avait été marquée par un évé-

nement considérable; nous voulons parler d'un changement momentané de climat qui, en imprimant, dans toute la zone tempérée, une activité extraordinaire aux précipitations atmosphériques, a permis aux phénomènes d'érosion et d'alluvionnement de se manifester sur une échelle grandiose. Comme conséquence de ce changement, de grandes nappes de neiges et de glaces ont couvert les massifs montagneux ainsi que les régions septentrionales, produisant, au moins dans toute l'Europe, un refroidissement marqué. Plus tard seulement la température s'est radoucie et le régime actuel s'est établi avec l'âge des tourbières et des habitations lacustres. De cette manière, tandis que, de nos jours, l'action des glaciers, des rivières et de l'atmosphère sur la surface terrestre est réduite à des proportions presque insignifiantes, cette action a suffi, au début de l'ère moderne, pour étaler sur de grandes étendues des dépôts parfois très épais.

Cette invasion des glaces n'a pas été soudaine. Nous venons de voir, en parlant des manifestations volcaniques de l'Auvergne, que, lors du pliocène supérieur, des glaciers descendaient du mont Dore jusqu'à Issoire. Il en était de même, sans doute, dans celles des gorges alpines qui étaient déjà disposées pour recevoir le produit de la concentration des chutes de neige. Toutefois, ce n'est qu'avec l'époque quaternaire que le phénomène est devenu général et vraiment caractéristique.

Abondance des chutes de pluie et de neige. — Nous avons vu qu'au voisinage des massifs montagneux de l'Europe, la période pliocène s'était terminée par le dépôt de puissantes alluvions, comme celles de la Bresse et de la côte ligurienne. Ces dépôts témoignent de l'activité que devaient alors avoir les agents d'érosion et du travail considérable qu'ils accomplissaient dans les pays accidentés, dont le relief se façonnait ainsi peu à peu.

Or, ce relief une fois constitué et les profondes vallées étant découpées jusqu'au centre des massifs, la prolongation, peut-être l'aggravation du régime humide, devaient avoir pour conséquence l'établissement de grands glaciers dans les montagnes, de grands cours d'eau dans les régions avoisinantes. En effet, tout ce qui tombe en pluie sur les plaines se condense

appartiendraient les *rhyolites* de la contrée, roches très acides, parfois porphyriques et vacuolaires (*porphyres molaires*), parfois sphérolithiques, en petits globules brillants (*perlites*).

Ainsi, d'une manière générale, on peut dire que l'activité volcanique a été continue depuis le début de l'ère tertiaire jusqu'à nos jours. A mesure que le continent européen se dessinait, les manifestations éruptives étaient de plus en plus rejetées vers les rivages de la Méditerranée, où elles sont de nos jours exclusivement concentrées.

CHAPITRE VI

ÈRE MODERNE OU QUATERNAIRE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉPOQUE QUATERNAIRE

Définition de l'époque quaternaire. — La partie de l'ère moderne qu'on a désignée sous le nom d'*époque quaternaire* (*postpliocène* et *pleistocène* de Lyell) est caractérisée par l'apparition de l'homme sur le globe.

Depuis que ce grand fait s'est produit, la géographie terrestre paraît, au moins dans nos contrées, n'avoir subi que des changements peu considérables. Le monde organique ne s'est enrichi d'aucune espèce nouvelle; mais plusieurs formes ont disparu parmi celles qui faisaient cortège aux premiers hommes, et les grands mammifères herbivores, déjà sur leur déclin vers la fin de la période pliocène, ont vu leurs principaux représentants quitter peu à peu la scène du monde ou se retirer dans les régions méridionales.

Il semblerait donc que l'étude de l'époque quaternaire ne dût pas être séparée de celle des phénomènes actuels, si cette phase de l'histoire du globe n'avait été marquée par un évé-

nement considérable; nous voulons parler d'un changement momentané de climat qui, en imprimant, dans toute la zone tempérée, une activité extraordinaire aux précipitations atmosphériques, a permis aux phénomènes d'érosion et d'alluvionnement de se manifester sur une échelle grandiose. Comme conséquence de ce changement, de grandes nappes de neiges et de glaces ont couvert les massifs montagneux ainsi que les régions septentrionales, produisant, au moins dans toute l'Europe, un refroidissement marqué. Plus tard seulement la température s'est radoucie et le régime actuel s'est établi avec l'âge des tourbières et des habitations lacustres. De cette manière, tandis que, de nos jours, l'action des glaciers, des rivières et de l'atmosphère sur la surface terrestre est réduite à des proportions presque insignifiantes, cette action a suffi, au début de l'ère moderne, pour étaler sur de grandes étendues des dépôts parfois très épais.

Cette invasion des glaces n'a pas été soudaine. Nous venons de voir, en parlant des manifestations volcaniques de l'Auvergne, que, lors du pliocène supérieur, des glaciers descendaient du mont Dore jusqu'à Issoire. Il en était de même, sans doute, dans celles des gorges alpines qui étaient déjà disposées pour recevoir le produit de la concentration des chutes de neige. Toutefois, ce n'est qu'avec l'époque quaternaire que le phénomène est devenu général et vraiment caractéristique.

Abondance des chutes de pluie et de neige. — Nous avons vu qu'au voisinage des massifs montagneux de l'Europe, la période pliocène s'était terminée par le dépôt de puissantes alluvions, comme celles de la Bresse et de la côte ligurienne. Ces dépôts témoignent de l'activité que devaient alors avoir les agents d'érosion et du travail considérable qu'ils accomplissaient dans les pays accidentés, dont le relief se façonnait ainsi peu à peu.

Or, ce relief une fois constitué et les profondes vallées étant découpées jusqu'au centre des massifs, la prolongation, peut-être l'aggravation du régime humide, devaient avoir pour conséquence l'établissement de grands glaciers dans les montagnes, de grands cours d'eau dans les régions avoisinantes. En effet, tout ce qui tombe en pluie sur les plaines se condense

Ultérieurement, le climat actuel s'est établi et les anciennes vallées fluviales du nord, trop larges pour les cours d'eau réduits qui les occupaient, se sont comblées avec de la tourbe. En même temps, toutes les dépressions du sol abandonné par les glaces, dans les régions septentrionales, sont devenues des tourbières.

Quant à la cause qui a produit ces variations de climat, il est probable qu'elle doit être cherchée dans des modifications géographiques, qui ont influé à la fois sur l'évaporation dans les pays chauds et sur la direction des courants d'air humide arrivant vers la zone tempérée froide.

Mais peut-être convient-il aussi de faire une part à certains facteurs astronomiques, par exemple à une augmentation dans l'excentricité de l'orbite terrestre.

Faune quaternaire. — Les changements climatiques des temps quaternaires se sont traduits par des variations correspondantes dans la faune des mammifères. Au début se montre surtout *Elephas antiquus*, avec *Rhinoceros Mercki* et *Hippopotamus major*. Ensuite vient le règne du mammoth ou *Elephas primigenius*, muni d'une crinière et d'une peau laineuse, et associé au rhinocéros à narines cloisonnées, ainsi qu'au grand ours des cavernes. Plus tard encore, le mammoth devient de plus en plus rare et la prépondérance appartient au renne, animal connu pour redouter les brouillards, tandis qu'il s'accommode bien des froids secs.

Les restes de l'homme, ou plus généralement ceux de son industrie, spécialement les *silex taillés*, n'apparaissent d'une manière bien authentique qu'avec l'âge où domine le mammoth. Les premiers instruments de silex, qualifiés de haches, sont taillés et non polis; c'est l'âge *paleolithique*, divisé en deux phases, dont la dernière correspond à l'âge du renne et comporte l'association des outils de silex avec des os sculptés et façonnés.

Avec l'âge des tourbières et des habitations lacustres apparaît la civilisation de la *Pierre polie* (*haches celtiques*) ou âge *néolithique*. Le bronze s'y associe bientôt à la pierre et prépare l'âge du fer.

Mais ces divisions, bonnes pour l'Europe occidentale, ne sont pas générales. Il est de plus à remarquer qu'elles ne passent

pas insensiblement l'une à l'autre et que chaque transformation marque l'invasion du pays par un peuple nouveau, arrivant de l'est et déjà plus avancé en civilisation que celui dont il vient occuper le sol par droit de conquête.

§ 2

DESCRIPTION DES DÉPÔTS QUATERNAIRES

Division des dépôts quaternaires. — Les dépôts quaternaires se ressentent nécessairement, dans leur composition, de la cause particulière qui leur a donné naissance. Par suite, il y a lieu de distinguer : 1° les dépôts formés sous l'influence de la grande nappe glaciaire des contrées septentrionales; ce sont ceux qui constituent le *drift*, *till* ou *terrain erratique*, ou encore le *diluvium du nord*; 2° les dépôts résultant de l'action directe des glaciers proprement dits dans les régions montagneuses; ce sont surtout les anciennes *moraines* et les *blocs erratiques*; 3° enfin les dépôts produits par l'action directe des grands cours d'eau et des pluies, c'est-à-dire les *alluvions* et les *limons*.

Terrain erratique du nord. — Le terrain erratique du nord est surtout formé par un limon argileux avec cailloux anguleux ou roulés, qualifié d'*argile à blocs* ou *boulder-clay*. C'est la moraine profonde de l'ancienne nappe glaciaire, qui a semé sur le Brandebourg, la Poméranie et la Russie, de nombreux blocs de provenance scandinave ou finlandaise. La grosseur de ces blocs diminue à mesure qu'on s'éloigne des centres de dispersion. Plusieurs ont certainement parcouru 4000 kilomètres, et il en est en Poméranie qui mesurent plus de 800 mètres cubes.

Les roches sur lesquelles la glace a dû passer ont été striées et polies, comme on le voit bien dans le sud de la Scandinavie et même encore aux environs de Berlin, sur l'îlot triasique de Rüdersdorf.

On distingue deux nappes d'argile à blocs, séparées dans le Brandebourg par des lentilles de sables fluviaux interglaciaires.

Moraines, blocs erratiques. — Les anciens glaciers, surtout ceux de la Suisse, ont laissé sur de nombreux points, comme

traces de leur passage, des moraines, reconnaissables à leur teinte grise, ainsi qu'aux cailloux anguleux, souvent frottés ou rayés, qu'elles renferment. Ils ont aussi semé, à des altitudes diverses et dans des situations parfois étranges, des *blocs erratiques* (fig. 124), qui permettent de reconstituer leur ancien parcours. Tels sont la *Pierre-à-Bot*, originaire du Valais et échouée sur le flanc du Jura, près de Neuchâtel, et le *Pflugstein*, arrivé des Alpes de Glaris jusqu'à Zurich. Le premier bloc a 16 mètres de long sur 5 de large et 13 de haut. Le second a 20 mè-



Fig. 124. — Bloc perché près du Bourget (d'après MM. Falsan et Chantre).

tres de hauteur. C'est par de tels blocs qu'on a pu s'assurer que les anciens glaciers de la Suisse avaient franchi le Jura vers 1200 mètres d'altitude et que les Vosges, ainsi que l'Auvergne, avaient eu aussi leurs glaciers.

En outre, une trace incontestable du passage des glaces consiste dans les *polis glaciaires*, qu'on observe aujourd'hui dans toutes les vallées où les agents atmosphériques ne les ont pas fait disparaître, et qui témoignent, mieux que toute autre chose, de la hauteur primitivement occupée par les glaces, dans ces gorges dont les derniers temps pliocènes avaient vu le creusement.

Alluvions, loess et limons. — Dans les pays où l'action glaciaire ne se faisait pas sentir, les cours d'eau ont laissé à diffé-

rentes hauteurs, sur les flancs des vallées actuelles, par suite des alternatives de comblement et de déblaiement (dues sans doute à des mouvements contraires du sol), des nappes d'alluvions, formées de cailloux roulés, de graviers, de sables et de limons. En général, la superposition est la suivante (fig. 125) : en bas, un *gravier de fond*, avec gros cailloux, diminuant de volume vers le haut et mélangés de sables; puis un *sable gras*

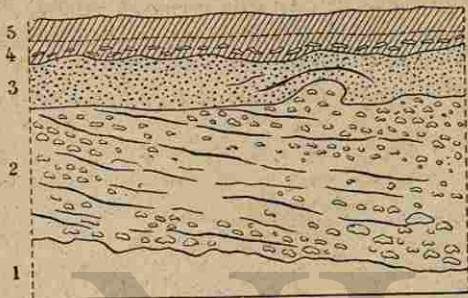


Fig. 125. — Disposition des alluvions quaternaires en Picardie : 1, craie; 2, graviers; 3, sable gras; 4, loess à cailloux anguleux; 5, limon brun.

ou alluvion de rive, déposé dans des eaux plus tranquilles; enfin une boue calcaire jaunâtre, à grain fin, dite *loess*, devenant à la surface d'un brun rouge foncé.

Sur les plateaux, où l'action fluviale ne s'est certainement pas fait sentir, par exemple, sur les plaines de la Picardie et de la Normandie, on retrouve le *loess* jaunâtre, surmonté du *limon des plateaux* ou *terre à briques*. Il est aisé de reconnaître dans le loess un *produit de ruissellement*, dû aux pluies abondantes de l'époque quaternaire. Les eaux des pluies, ravinant les sédiments tertiaires meubles, autrefois répandus à la surface des plateaux ou, en général, les produits de l'altération sur place des roches superficielles, laissent sur les hauteurs les débris impalpables sous la forme du loess. Plus tard, l'action des eaux d'infiltration, et plus encore les alternatives de la température, à l'époque où le sol était gelé dans la profondeur, ont oxydé et rubéfié la surface du loess, dissolvant le calcaire, transformant le loess en limon à briques et faisant éclater les silex qu'il contenait. Cette rubéfaction n'a pas pénétré partout à la

même profondeur, en sorte que, si l'on s'en rapportait à la couleur, on croirait voir un *diluvium rouge*, superposé en discordance aussi bien au limon qu'aux cailloutis non rubéfiés ou *diluvium gris*.

Dépôt des cavernes. — Pour compléter l'énumération des dépôts quaternaires, il est nécessaire de parler de ceux qui se sont formés dans les grottes ou *cavernes*, étagées à diverses hauteurs sur les flancs calcaires de certaines vallées.

Pendant les périodes très humides, le phénomène de l'infiltration s'y est produit avec une grande activité, faisant naître d'épais revêtements et planchers *stalagmitiques*, où l'on trouve

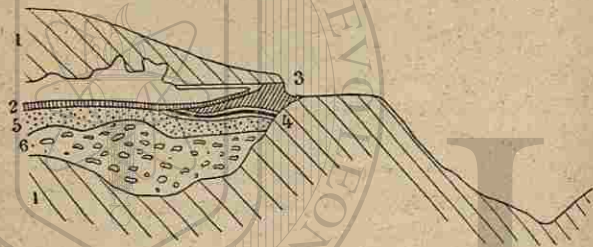


Fig. 126. — Coupe d'une caverne quaternaire. — 1, calcaire; 2, plancher stalagmitique moderne; 3, brèche à ossements; 4, couche noire; 5, limon des cavernes; 6, cailloux roulés.

incrustés les ossements des animaux qui fréquentaient les grottes. Quelquefois les pluies et même les cours d'eau y pénétraient, donnant lieu à des dépôts de graviers, plus ou moins enchevêtrés avec les nappes de stalagmites (fig. 126), ou même avec des couches de cendres, témoins de l'habitation temporaire des grottes par l'homme. Enfin, lors de la dernière période froide, qui avait complètement interrompu les infiltrations, le loess du dehors, pendant les dégels de l'été, a souvent pénétré à l'état de bouillie, dans l'intérieur des cavernes, par des fentes s'ouvrant à la surface. Ainsi le sol de beaucoup de grottes s'est tapissé d'un *limon rouge des cavernes*, avec éclats anguleux de silice, souvent avec ossements de renne, parfois assez abondants pour transformer le dépôt en une *brèche ossifère*. Après quoi, la formation des stalagmites a repris avec le retour de l'humidité dans la période actuelle.

§ 3

ÉRUPTIONS QUATERNAIRES.

Auvergne. — En Auvergne, les éruptions quaternaires ont suivi sans discontinuité celles de la fin du pliocène. C'est à cette époque que s'est formé, sur le flanc du mont Dore, le cratère du Tartaret et que se sont épanchées, sur le fond des vallées de Besse et de Compains, de belles coulées de lave à surface déchiquetée. En même temps, une ancienne fente, qui avait autrefois livré passage à du granite, s'est ouverte de nouveau sur le plateau qui domine la Limagne. Les projections y ont édifié les remarquables cônes de la chaîne du Puy de Dôme, dont la formation paraît avoir coïncidé avec l'âge du renne. De ces cratères sont sorties des laves, les unes *andésitiques*, par exemple celle de Volvic, les autres *basaltiques*, comme celle qui, divisée en beaux prismes verticaux, occupe la vallée de la Sioule, près de Pontgibaud.

Pendant ce temps, le Velay voyait s'accumuler des *tufs*, où l'on a trouvé, à la Denise, des ossements humains.

Région méditerranéenne. — Tandis que les éruptions d'Auvergne cessaient avec la période historique, celles d'Italie, qui n'avaient commencé qu'à la fin du pliocène, se sont poursuivies jusqu'à nos jours.

C'est au début du quaternaire qu'on rapporte les célèbres *tufs* des Champs Phlégréens, près de Naples, tufs sous-marins, mais aujourd'hui soulevés à une grande hauteur. Sur ces tufs, essentiellement *trachytiques*, s'est édifié le volcan de la Somma, au centre duquel le Vésuve, proprement dit a pris naissance par explosion en l'an 79 de notre ère.

Les *tufs palagonitiques* de Sicile, qui servent de base à l'Etna, datent de la fin du pliocène ou du commencement du quaternaire. C'est donc à cette dernière période qu'appartient en entier la formation du volcan, qui n'a cessé de rejeter des laves *basaltiques* riches en labrador, mais dépourvues de péridot.

Enfin les volcans de l'Archipel grec, comme celui de Santorin, ont également commencé leurs manifestations à la fin du pliocène et leurs éruptions coïncident avec les mouvements du sol qui ont déterminé l'ouverture tardive de la mer Égée.

CHAPITRE VII

FILONS MÉTALLIFÈRES. PHÉNOMÈNES
OROGÉNIQUES

§ 1

FILONS MÉTALLIFÈRES.

Définition des gîtes métallifères. — On sait que, de nos jours, les manifestations volcaniques sont habituellement suivies par des dégagements solfatariaux et thermominéraux, qui donnent lieu, dans leurs canaux d'ascension, au dépôt de diverses substances. C'est à des émanations du même genre, survenues à la suite des anciennes périodes éruptives, qu'est due la formation de la plupart des *gîtes métallifères*. Leur allure ordinaire est celle de *filons*, c'est-à-dire de fentes ouvertes à travers les terrains de l'écorce terrestre et remplies après coup par des *minerais métalliques*, le plus souvent des *sulfures*, associés à des gangues pierreuses.

Formation des filons. — Les fentes où s'établissent les filons métallifères sont généralement très inclinées et voisines de la verticale. Elles résultent des efforts de tension et surtout de *torsion*, auxquels les parties les plus résistantes de l'écorce ont été soumises lors de la formation des montagnes.

Toutes les fois que ces fentes se sont produites dans des roches suffisamment solides, elles sont restées assez ouvertes pour permettre la lente circulation, à la fois des eaux d'infiltration venant de la surface, et des eaux chaudes ascendantes venant de la profondeur. Ces dernières entraînaient en général, au milieu de gaz chlorurés, sulfurés et hydrocarbonés, empruntés au réservoir interne, des sulfures alcalins et, à la faveur de ceux-ci, divers sulfures métalliques. De plus, elles dissolvaient sur leur passage, à l'état de silicates et de carbonates, une partie des éléments des roches qu'elles traversaient. Près du

jour, la pression et la température étant moins élevées, il se produisait, sous des influences à la fois physiques, chimiques et électriques, des réactions qui amenaient le dépôt, sur les parois des fentes, soit par évaporation, soit par précipitation, de substances concrétionnées ou cristallisées. Partout où l'air extérieur n'avait pas accès, le dépôt se faisait au sein d'un milieu réducteur et il se formait, avec les gangues, des *sulfures métalliques cristallisés*. Mais plus haut, les réactions se compliquaient par le mélange des eaux ascendantes avec les eaux froides superficielles, ces dernières amenant avec elles de l'air et diverses substances dissoutes dans la traversée des roches, enfin, si les fentes débouchaient sous la mer, des sels, chlorures, bromures, sulfates, etc. Aussi trouve-t-on la partie supérieure des filons notablement *oxydée*. La *limonite* ou peroxyde de fer hydraté y domine, d'où le nom de *chapeau de fer* qu'on lui donne. Souvent aussi on y rencontre des métaux natifs, produits par double décomposition, sous des influences analogues à celles qui sont utilisées dans la galvanoplastie.

Minerais d'étain. — Les minerais d'étain ont toujours accompagné, plutôt que suivi, la sortie des *granulites* à mica blanc et tourmaline. Ils remplissent moins des fentes définies que des réseaux de veines ou de veinules, formant comme une auréole à la périphérie des noyaux granulitiques (Cornouailles, Bretagne, Limousin). Sous quelque forme que l'étain soit arrivé de la profondeur, la facilité avec laquelle il s'oxyde a déterminé son dépôt sous la forme d'*étain oxydé* ou *cassitérite*, disséminé en grains ou en cristaux bruns dans le *quartz* laiteux, souvent avec de l'émeraude et de l'apatite (phosphate de chaux).

Minerais d'or. — L'or paraît être venu à l'état de sulfure, en compagnie de la *pyrite de fer*, au moment de l'éruption de roches *dioritiques*. Mais les dissolutions métallifères, qui déposaient dans la profondeur, avec du *quartz*, une pyrite plus ou moins chargée d'or, ont dû, en arrivant près de la surface, abandonner le fer à l'état d'oxyde, tandis que l'or *natif* se précipitait, en grains ou en *pépites*, au sein du quartz. Les têtes des filons ayant été enlevées par érosion, l'or, grâce à sa densité et à son inaltérabilité, est souvent resté intact parmi les

alluvions. Ainsi se sont formés les gisements riches ou *placers* de Californie et d'Australie.

Dans le Gard, la venue de l'or est antérieure au terrain houiller, dont les conglomérats contiennent du quartz aurifère. Mais il y a eu aussi une venue d'or moderne, comme celle qui a formé au Nevada le célèbre filon dit *Comstock lode*.

Minerais de cuivre. — C'est aussi avec des roches basiques et spécialement avec des *mélaphyres* ou des *diorites*, que les émanations de *cuivre* se sont fait jour. Elles ont été particulièrement abondantes aux époques permienne et triasique, donnant naissance à des dépôts de sulfures (cuivre pyriteux, cuivre panaché), parfois d'arséniures et d'antimoniures (cuivre gris), transformés près de la surface en carbonate bleu (azurite) ou carbonate vert (malachite). Parfois les sels de cuivre se sont épanchés au milieu des sédiments contemporains, comme dans le Mansfeld, où le cuivre pyriteux, argentifère, imprègne un

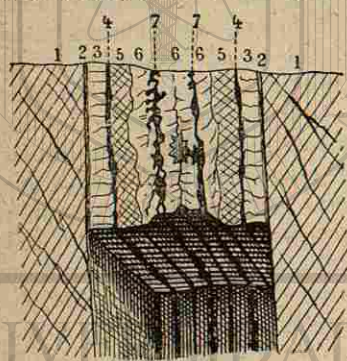


Fig. 127. — Coupe d'un filon concrétionné en exploitation. — 1, 4, épontes du filon ou roche encaissante; 2, 2, parois argileuses dites *ralbandes*; 3, quartz; 4, pyrite de fer; 5, calcite; 6, quartz et barytine; 7, blende et galène.

schiste bitumineux permien, riche en poissons, et dans le Var, où les carbonates de cuivre servent de ciment à un poudingue triasique.

Minerais de plomb argentifère et de zinc. — Les gisements de minerais de plomb, généralement argentifères et très souvent associés aux minerais de zinc, parfois à ceux de cuivre, réalisent mieux que tous les autres le type des filons concrétionnés ou d'incrustation (fig. 127), c'est-à-dire formés par le dépôt régulier, sur les parois d'une fente, de bandes alternatives de gangues et de minerais, se répétant symétriquement à droite et à gauche.

Les minerais sont : la *galène* ou sulfure de plomb, la *blende* ou sulfure de zinc, le *cuivre pyriteux* ou sulfure de fer et de

cuivre, quelquefois l'*argent rouge*, combinaison de l'argent avec le soufre et l'antimoine ou l'arsenic. Les gangues dominantes sont le quartz, la calcite ou carbonate de chaux, le carbonate de fer, la barytine ou sulfate de baryte et quelquefois la fluorine ou fluorure de calcium.

Pour plusieurs filons plombifères, on a la preuve que leur remplissage s'est opéré à l'époque du trias ou à celle du lias inférieur.

Richesse des filons. Gites calaminaires. — Il s'en faut de beaucoup que la richesse d'un filon soit la même dans toutes ses parties. Les circonstances de cette distribution sont assez capricieuses, ce qui se comprend si l'on réfléchit à la nature des réactions multiples qui ont dû influencer le dépôt des minerais. On constate, dans bien des cas, un rapport étroit entre la richesse d'un filon et la qualité des roches qui forment les parois ou *épontes*. De la sorte, si un filon traverse successivement plusieurs terrains, sa richesse ne demeure pas constante. On se rend aisément compte de ce résultat en remarquant, d'abord que le mode de formation des fentes et leur bonne conservation, si nécessaire à la circulation des dissolutions métallifères, dépendent au plus haut degré de l'espèce des roches; ensuite que les réactions chimiques qui provoquent le dépôt des minerais ne peuvent manquer d'être influencées, soit par la composition, soit par l'état physique et la conductibilité des terrains encaissants.

Par exemple, lorsqu'un filon de blende passe d'un schiste dans un calcaire, il s'élargit brusquement et se change en un amas irrégulier, parfois très puissant, de carbonate et de silicate de zinc (*calamine*). Il est évident que les eaux, qui traversaient sans pouvoir l'attaquer la masse schisteuse, ont dissous et corrodé de proche en proche le calcaire, dont les fissures les mettaient en outre en contact avec des éléments oxydants. On donne le nom de *gites calaminaires* à ces filons élargis, dont il existe de beaux exemples à la Vieille-Montagne ainsi qu'au Laurium. On peut penser que l'imperméabilité des schistes, en obligeant les eaux à s'étaler à droite et à gauche dans le calcaire, a beaucoup contribué à cet élargissement.

§ 2

PHÉNOMÈNES OROGÉNIQUES.

Principe des phénomènes. — L'étude des périodes géologiques successives nous a montré qu'à bien des reprises, des modifications plus ou moins considérables s'étaient produites dans la distribution relative des terres et des mers. De tels changements accusent, de la part de l'écorce terrestre, une mobilité dont la cause semble facile à indiquer, si l'on accepte l'hypothèse de la masse ignée interne. En effet, avec le temps, le noyau igné doit se contracter, parce qu'il perd de la chaleur et qu'une partie de sa substance est rejetée au dehors par les éruptions. Mais si épaisse que puisse être la croûte solide, il est vraisemblable qu'elle ne correspond qu'à une petite fraction du rayon terrestre, dont la longueur dépasse 6000 kilomètres. Elle garde donc, dans l'ensemble, assez de flexibilité pour avoir besoin d'être soutenue, et lorsque son support vient à faiblir, il faut qu'elle se déforme en conséquence.

Allure générale des déformations. — Cette déformation, comme l'a indiqué Élie de Beaumont, doit être analogue à celle qui se produit dans une étoffe primitivement bien tendue et dont une cause quelconque diminue la tension.

Dans ce cas, l'excès d'ampleur détermine la formation d'un *rempli*, c'est-à-dire d'une juxtaposition de deux rides, l'une saillante, l'autre rentrante, dont la première tend à se renverser sur la seconde. Il y a donc à la fois *souèvement* d'une partie de l'étoffe et *affaissement* de la portion immédiatement contiguë.

Telle paraît bien être, en effet, l'allure générale des dislocations terrestres. Presque partout on observe que les plus fortes lignes de relief, préparées par des ondulations successivement croissantes, occupent une situation littorale, regardant par leur flanc le plus abrupt une dépression océanique, qui reproduit la même disposition en sens inverse (fig. 128). Si donc les déformations de l'écorce résultent d'un mouvement général *centripète*, provoqué par la contraction progressive du noyau fluide, il n'en est pas moins vrai que les montagnes représentent des

portions de l'écorce *soulevées* relativement au niveau moyen primitif, tandis que les dépressions océaniques correspondent à des portions *affaissées*. Le tout résulte de mouvements *latéraux de refoulement*, qui peuvent avoir des *composantes* à la fois suivant l'*horizontale* et suivant la *verticale*, et dont les effets déterminent les traits principaux du relief terrestre, en premier

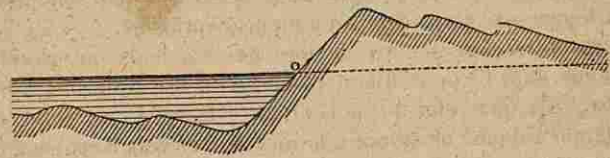


Fig. 128. — Allure générale des déformations de l'écorce.

lieu les *montagnes*, ce qui permet de les ranger sous la dénomination générale de *phénomènes orogéniques*. Chaque modification de ce relief influe sur le jeu des puissances extérieures; mais ces dernières se bornent à découper, d'une manière plus ou moins capricieuse, les parties de l'écorce que les mouvements orogéniques ont fait surgir en les disloquant.

Formes diverses des dislocations. — La tendance à la déformation, dont le principe vient d'être indiqué, produit des effets très différents, suivant l'état particulier des terrains qui en subissent l'influence. Les massifs d'ancienne consolidation, trop rigides pour se plisser, tels que les premiers îlots de terrain primitif, se brisent en compartiments, limités par des *failles*, le long desquelles ces compartiments *jouent* les uns par rapport aux autres, comme on le voit dans le Morvan et le Plateau Central. Des systèmes épais de sédiments solides, lorsque le refoulement ne les pousse pas contre un noyau résistant, se soulèvent en masse (parfois en plusieurs parties limitées par des cassures) et font naître de hauts plateaux à stratification régulière, comme ceux où l'érosion a creusé les célèbres gorges ou *cañons* du Colorado. Si des assises sédimentaires relativement plastiques sont refoulées contre un obstacle rigide, comme l'ont été les couches secondaires et tertiaires du Jura contre le massif souterrain de terrain primitif qui relie le Plateau Central aux Vosges, elles se plissent en ondulations

parallèles, les unes saillantes ou *anticlinales*, les autres rentrantes ou *synclinales*, et qui tendent parfois à se renverser du côté d'où vient la poussée. Enfin lorsque, comme dans les Alpes, le refoulement a été assez énergique pour faire arriver au jour le *stratum* primitif, les cassures qui l'accidentent se répercutent, sur les lambeaux de son ancienne couverture sédimentaire, soit par des *failles*, soit, si les couches sont assez plastiques, par des plis plus ou moins capricieux.

Effondrements. — Au nombre des accidents qui peuvent survenir dans l'écorce, il faut comprendre les grands *effondrements*, tels que celui qui a fait naître la vallée du Rhin, ou celui qui a donné naissance à la mer Morte. Mais il convient de remarquer que la plupart de ces accidents résultent de la chute d'un compartiment de l'écorce, situé précisément à la *clef d'une voûte* en voie de formation. Ainsi les Vosges et la Forêt Noire constituaient un massif homogène soulevé en masse et dont la partie culminante s'est rompue sous l'effort qu'elle subissait, laissant s'écrouler un *voussoir*, dont la chute a fait naître la vallée du Rhin. De même, la mer Morte occupe l'emplacement d'une faille très nette, survenue au sommet d'un pli *anticlinal* remarquablement rectiligne, qui comprend avec cette mer la vallée du Jourdain. La faille se poursuit en se coudant par les coupures du Wadi-Arabah et du golfe d'Akaba et atteint la mer Rouge, dont elle détermine l'alignement jusqu'à Massouah, pour se prolonger ensuite sous la forme d'une falaise qui fait la limite orientale de l'Abyssinie. Ainsi les effondrements alignés, ceux qui ne dépendent pas immédiatement de l'action volcanique, rentrent dans la formule générale du phénomène orogénique. Chacun d'eux indique un *maximum de tension*, que l'écorce solide n'a pu supporter sans se rompre, en laissant s'écrouler le sommet de la voûte rompue.

Exemples de dislocations. — Comme exemple bien typique d'une dislocation, où les plissements se combinent avec des failles, on peut citer l'accident qui a déterminé la situation actuelle du terrain houiller de la bande franco-belge. Au début du silurien, les couches cambriennes furent redressées et formèrent dans le Condros une arête, par laquelle le bassin de Dinant se trouva séparé de celui de Namur. Après ce mouve-

ment, dit *ridement de l'Ardenne*, les sédiments dévoniens et carbonifères se déposèrent dans les deux dépressions. Puis, avant la période triasique, eut lieu le *ridement du Hainaut*. Les couches du bassin de Namur, déjà transgressives sur le cambrien, furent d'abord rebourbées en un pli anticlinal (fig. 129), dont



Fig. 129.

le versant septentrional, devenu bientôt plus raide que l'autre (fig. 130), finit par se renverser (fig. 131) sous l'effort de la

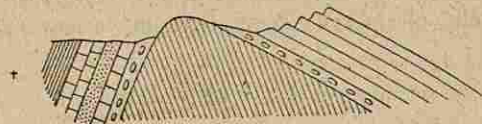


Fig. 130.

poussée. Le refoulement continuant à se faire sentir, la poussée latérale ne tarda pas à devenir assez forte pour déterminer,

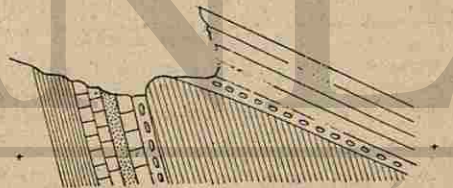


Fig. 131.

le long de la jonction avec le cambrien, une faille très oblique, sur le plan de laquelle la lèvre du midi glissa de bas en haut, de manière à venir chevaucher par-dessus la tranche des couches de l'autre versant (fig. 132). La compression était si grande que les couches renversées furent plus d'une fois repliées en nombreux zigzags, en même temps qu'un lambeau, détaché de l'une des deux lèvres et dit *lambeau de poussée*, était entraîné dans le mouvement d'ascension de la lèvre méridionale.

Il est des cas où les circonstances de la dislocation, en faisant

tomber des *paquets* entiers de couches entre deux cassures, ont fini par donner lieu aux apparences les plus compliquées,

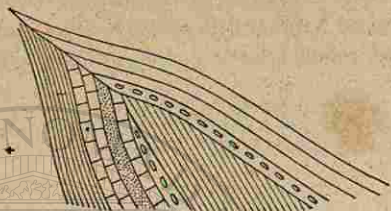


Fig. 132.

comme le montrent les figures 133 et 134. Parfois la complication est telle, que la tâche du stratigraphe devient aussi ardue

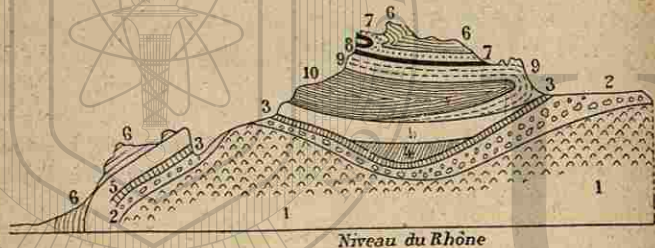


Fig. 133. — Coupe des Dents de Morcles (Suisse). — 1, schistes cristallins; 2, terrain houiller; 3, cargneules; 4, lias; 5, calcaire jurassique; 6, néocœmien; 7, urgonien; 8, gault; 9, terrain nummulitique; 10, flysch en pli couché.

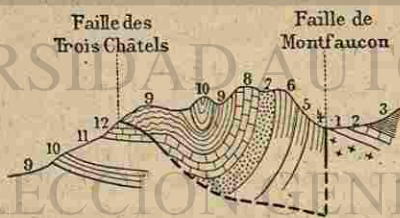


Fig. 134. — Coupe d'une dislocation des environs de Besançon.
1, trias; 2, 3, lias; 4 à 12, couches oolithiques.

que le serait celle d'un architecte, chargé de numérotter, conformément à leur situation originelle, les matériaux d'un édifice effondré.

Dans les régions fortement plissées, il peut arriver qu'une couche résistante, telle qu'un calcaire, ayant été poussée, en se brisant, à travers des sédiments beaucoup plus plastiques, par exemple des argiles et des schistes, ces derniers soient plus tard enlevés par l'érosion. Alors on retrouve en saillie, isolés à l'état de petits récifs, pareils à d'énormes blocs erratiques, et dans toutes les inclinaisons imaginables, les lambeaux de strates calcaires, qui paraissent reposer, n'importe comment, sur des terrains d'âge plus récent. Tel est le cas des célèbres *Klippen* ou récifs des Carpathes.

Importance des directions. — L'effort de refoulement vient, en général, d'une *direction* déterminée et tend à se traduire par des accidents *parallèles*. Mais à la rencontre d'un obstacle, cette direction peut être sensiblement infléchie. C'est ainsi que les plis du Jura, dirigés du sud au nord dans la partie méridionale, parce que tel est l'alignement du bord oriental du Plateau Central, se courbent progressivement au nord-est en Franche-Comté, conformément au parcours du massif souterrain dont l'îlot granitique de la Serre atteste l'existence, pour prendre ensuite, le long du bord méridional des Vosges et de la Forêt Noire, une direction est-ouest. Si donc les alignements des chaînons présentent, dans l'étude des montagnes, une incontestable importance, il ne faut pas oublier, d'une part, que des directions multiples peuvent correspondre à un même effort; d'autre part, qu'une même direction peut se reproduire à des époques différentes.

Age relatif des dislocations. — L'*âge relatif* des dislocations est d'une appréciation souvent fort délicate. Naturellement tout accident orogénique est plus récent que les terrains dont il a dérangé la stratification. Mais comme beaucoup de massifs ont subi l'influence d'efforts successifs, il peut être fort malaisé de démêler ce qui revient à chacun d'eux. Quand il s'agit de cassures, on fait intervenir utilement la considération des *rejets*. En effet, une cassure, avec ou sans dénivellation des parois, s'étant produite dans un terrain, si plus tard une nouvelle fracture survient, elle entraînera, en général, un déplacement relatif des deux parties de la cassure précédente qu'elle traverse, et dont la trace sur le sol cessera ainsi d'être continue.

Le moyen le plus sûr de déterminer l'âge relatif des accidents du sol serait de reconstituer, à toute époque, les rivages maritimes, nécessairement influencés par chaque nouvelle dislocation. Seulement cette tâche est difficile à remplir, parce que les sédiments littoraux, les seuls sur lesquels la détermination puisse être fondée, ont souvent disparu sous l'effort des érosions. L'état de morcellement des terrains est extrême dans les districts montagneux et il en est beaucoup où l'on ne saurait évaluer à moins de *mille mètres* l'épaisseur de couches que le travail des agents d'érosion a enlevées dans le cours des âges, en profitant des innombrables fractures que les mouvements de l'écorce y avaient fait naître.

Principales époques de dislocations. — Bien que les changements de la géographie terrestre aient été continuels, il en est beaucoup, par exemple ceux des temps secondaires, qui se sont produits sans amener de grands troubles dans l'écorce et sans entraîner de mouvements qu'on puisse qualifier d'orogéniques. Les perturbations de l'équilibre de la croûte ont été particulièrement énergiques pendant l'ère primaire, et aussi depuis la fin de l'éocène jusqu'aux débuts du pliocène. Aux mouvements primaires se rapportent les anciens ridements de l'Armorique et de l'Ardenne. Plus tard, à l'époque du ridement du Hainaut, des refoulements d'une rare puissance ont affecté le terrain houiller inférieur, non seulement en Europe, mais en Amérique, créant dans les massifs anciens les dépressions où devaient se former les dépôts du terrain houiller supérieur. Un dernier écho de ces efforts, survenant avec le permien supérieur ou le trias, a bouleversé la stratification des bassins houillers du Plateau Central. Si ces mouvements ont fait naître en Europe des lignes de relief de quelque importance, du moins les érosions des périodes subséquentes n'en ont rien laissé subsister.

Au commencement de l'oligocène se sont dressées dans les airs la chaîne des Pyrénées et celle des Apennins. Puis les grands mouvements ont repris avec l'époque helvétique, où les pressions latérales paraissent avoir atteint leur maximum d'intensité, se résolvant dans le soulèvement du Jura, des Alpes, des Carpathes et de l'Himalaya.

Chacun de ces mouvements avait d'ailleurs été préparé de longue date et il n'est guère de lignes de relief où l'on ne puisse reconnaître la trace d'efforts successifs, produits à des époques parfois très différentes.

CHAPITRE VIII

CONSIDÉRATIONS GÉOGÉNIQUES

§ 1

CAUSES DES VARIATIONS DE LA CHALEUR EXTERNE.

Principe du phénomène paléothermal. — La conception de la fluidité primitive de notre planète, entraînant comme conséquence la conservation, jusqu'à nos jours, d'une masse ignée interne, explique d'une manière satisfaisante, avec la forme actuelle du globe, la constitution de l'écorce ainsi que le jeu des phénomènes éruptifs et orogéniques. Mais il est une chose dont cette hypothèse ne suffit pas à rendre compte, c'est l'uniformité climatérique des premiers âges géologiques.

S'il est un fait que la paléontologie, et spécialement la branche de cette science qui s'occupe du monde végétal, ait bien mis en évidence, c'est assurément la diminution progressive de la chaleur dans les hautes latitudes de notre globe. Nous avons vu que, pendant toute la durée des temps primaires, un climat semblable à celui des tropiques paraissait avoir régné depuis l'équateur jusqu'aux pôles, et c'est à peine si, vers la moitié de l'ère secondaire, a commencé à se manifester le rétrécissement progressif de la zone tropicale. Au milieu de l'ère tertiaire, le Groenland nourrissait encore une végétation semblable à celle qui, de nos jours, caractérise la Louisiane, et les mêmes plantes florissaient au Spitzberg, ainsi que dans la presqu'île d'Alaska. L'apparition des glaces polaires a donc

Le moyen le plus sûr de déterminer l'âge relatif des accidents du sol serait de reconstituer, à toute époque, les rivages maritimes, nécessairement influencés par chaque nouvelle dislocation. Seulement cette tâche est difficile à remplir, parce que les sédiments littoraux, les seuls sur lesquels la détermination puisse être fondée, ont souvent disparu sous l'effort des érosions. L'état de morcellement des terrains est extrême dans les districts montagneux et il en est beaucoup où l'on ne saurait évaluer à moins de *mille mètres* l'épaisseur de couches que le travail des agents d'érosion a enlevées dans le cours des âges, en profitant des innombrables fractures que les mouvements de l'écorce y avaient fait naître.

Principales époques de dislocations. — Bien que les changements de la géographie terrestre aient été continuels, il en est beaucoup, par exemple ceux des temps secondaires, qui se sont produits sans amener de grands troubles dans l'écorce et sans entraîner de mouvements qu'on puisse qualifier d'orogéniques. Les perturbations de l'équilibre de la croûte ont été particulièrement énergiques pendant l'ère primaire, et aussi depuis la fin de l'éocène jusqu'aux débuts du pliocène. Aux mouvements primaires se rapportent les anciens ridements de l'Armorique et de l'Ardenne. Plus tard, à l'époque du ridement du Hainaut, des refoulements d'une rare puissance ont affecté le terrain houiller inférieur, non seulement en Europe, mais en Amérique, créant dans les massifs anciens les dépressions où devaient se former les dépôts du terrain houiller supérieur. Un dernier écho de ces efforts, survenant avec le permien supérieur ou le trias, a bouleversé la stratification des bassins houillers du Plateau Central. Si ces mouvements ont fait naître en Europe des lignes de relief de quelque importance, du moins les érosions des périodes subséquentes n'en ont rien laissé subsister.

Au commencement de l'oligocène se sont dressées dans les airs la chaîne des Pyrénées et celle des Apennins. Puis les grands mouvements ont repris avec l'époque helvétienne, où les pressions latérales paraissent avoir atteint leur maximum d'intensité, se résolvant dans le soulèvement du Jura, des Alpes, des Carpathes et de l'Himalaya.

Chacun de ces mouvements avait d'ailleurs été préparé de longue date et il n'est guère de lignes de relief où l'on ne puisse reconnaître la trace d'efforts successifs, produits à des époques parfois très différentes.

CHAPITRE VIII

CONSIDÉRATIONS GÉOGÉNIQUES

§ 1

CAUSES DES VARIATIONS DE LA CHALEUR EXTERNE.

Principe du phénomène paléothermal. — La conception de la fluidité primitive de notre planète, entraînant comme conséquence la conservation, jusqu'à nos jours, d'une masse ignée interne, explique d'une manière satisfaisante, avec la forme actuelle du globe, la constitution de l'écorce ainsi que le jeu des phénomènes éruptifs et orogéniques. Mais il est une chose dont cette hypothèse ne suffit pas à rendre compte, c'est l'uniformité climatérique des premiers âges géologiques.

S'il est un fait que la paléontologie, et spécialement la branche de cette science qui s'occupe du monde végétal, ait bien mis en évidence, c'est assurément la diminution progressive de la chaleur dans les hautes latitudes de notre globe. Nous avons vu que, pendant toute la durée des temps primaires, un climat semblable à celui des tropiques paraissait avoir régné depuis l'équateur jusqu'aux pôles, et c'est à peine si, vers la moitié de l'ère secondaire, a commencé à se manifester le rétrécissement progressif de la zone tropicale. Au milieu de l'ère tertiaire, le Groenland nourrissait encore une végétation semblable à celle qui, de nos jours, caractérise la Louisiane, et les mêmes plantes florissaient au Spitzberg, ainsi que dans la presqu'île d'Alaska. L'apparition des glaces polaires a donc

été très tardive et l'on peut presque la considérer comme ayant mis fin aux temps géologiques proprement dits, pour inaugurer l'ère actuelle.

D'autre part, une augmentation de la chaleur solaire dans le passé ne saurait rendre compte du privilège dont les hautes latitudes ont si longtemps joui : car l'équateur en aurait eu sa part et cette exagération de température eût certainement rendu la vie impossible dans son voisinage. Or dans quelques latitudes qu'on descende, la paléontologie nous montre des espèces, fougères et cycadées, qui sont loin d'exiger un degré de chaleur supérieur à celui de la zone torride actuelle. En outre, les plus anciennes, les fougères, sont des plantes qui recherchent l'ombre, et les premiers insectes dont on ait observé les restes appartiennent à des familles qui aujourd'hui vivent de préférence dans les lieux obscurs. Ce n'est donc ni par un excès de chaleur ni par un excès de lumière que se caractérise ce qu'on a justement appelé le *phénomène paléothermal*. C'est par une répartition uniforme de la chaleur des tropiques, s'étendant, sans variations sensibles, d'une extrémité à l'autre du globe. Trouver la cause de cette uniformité, si contraire à la distribution actuelle des climats, tel est le problème qu'il s'agit de résoudre.

Insuffisance des causes géographiques. — Un tel fait peut-il être expliqué par le changement des conditions géographiques? Nous ne pensons pas qu'il soit possible de le soutenir. Assurément nous reconnaissons quelle influence exercent, sur les climats, la disposition réciproque des terres et des mers, la situation tropicale ou tempérée des continents, la prédominance, plus ou moins marquée en chaque point, de l'élément liquide, enfin la valeur du relief. Si donc il s'agissait d'expliquer des faits locaux, nous admettrions volontiers que la chaleur eût varié, en tel ou tel point, par suite d'une modification survenue dans l'altitude, dans l'exposition ou dans le parcours des courants marins. La suppression du *Gulf stream*, par exemple, apparaîtrait comme une cause suffisante pour produire, dans l'Atlantique nord, une notable diminution de la température.

Mais des changements de ce genre n'agiraient pas sur tout le

globe terrestre à la fois et, la chaleur totale que verse le soleil restant la même, elle serait seulement répartie d'une façon différente. Jamais des modifications de cette nature n'empêcheraient qu'il y eût, sur le globe, une zone torride et une zone glaciale, et de quelque façon qu'on distribue par la pensée les terres et les mers, il sera toujours impossible de produire, sur la surface de la terre, cette égalité absolue de température, indépendante de la latitude, qu'atteste l'examen de la flore houillère.

Stabilité de l'axe terrestre. — Quant à la ressource, souvent invoquée, qui consisterait dans un déplacement de l'axe terrestre, capable de faire profiter successivement toutes les parties du globe de la chaleur équatoriale, cette conception, admissible en principe, se heurte à d'insurmontables difficultés de fait. En premier lieu, ceux qui ont abordé la question par le calcul ont établi que, pour déplacer l'axe des pôles d'une simple fraction de degré, il faudrait, dans le relief du globe, des modifications incomparablement plus grandes que celles qui ont pu accompagner la production des plus hautes chaînes de montagnes. De plus, aussi loin que nous conduise la botanique fossile, qu'il s'agisse du miocène ou de la période oolithique, les zones de végétation, déjà dessinées ou esquissées, semblent concentriques au pôle actuel, comme si sa position n'avait jamais varié d'une manière sensible.

D'ailleurs un déplacement du pôle ne ferait que transporter à de nouvelles régions le bénéfice des conditions climatériques de la zone tropicale, et ne pourrait jamais produire l'uniformité que nous avons signalée comme la caractéristique des premiers âges.

Insuffisance de la chaleur interne. — Laissant donc de côté l'axe terrestre, il faut chercher dans une cause agissant partout à la fois le principe de l'uniformité signalée. Cette cause, plusieurs ont cru la trouver dans le rayonnement de la chaleur interne, à laquelle une moindre épaisseur de l'écorce eût permis, dans les temps paléozoïques, de contribuer efficacement à la température de l'atmosphère. Mais cette hypothèse ne résiste pas à l'examen. Partout où le terrain primitif de gneiss et de micaschistes se montre au jour, c'est par milliers

de mètres que se compte son épaisseur, et dès lors il est évident qu'aux époques paléozoïques, une écorce de plusieurs kilomètres protégeait déjà la chaleur centrale contre la déperdition. Or pour qui connaît la mauvaise conductibilité des roches, c'est plus qu'il n'en faut pour réduire à presque rien l'apport extérieur du foyer interne.

Pour produire une température corallienne, c'est-à-dire une moyenne de $+20^{\circ}$ au moins, dans des parages où règne aujourd'hui une moyenne de -15° à -20° , il faudrait, à travers l'écorce, un flux de chaleur capable d'augmenter de 40° la température extérieure. Or une telle addition, qui devrait avoir lieu aussi dans les régions tropicales, suffirait pour y mettre à néant toute activité physiologique, et la mer deviendrait inhabitable pour tout organisme tant soit peu élevé. Enfin ce n'est pas seulement de chaleur, c'est aussi de lumière que les végétaux tertiaires du Groenland avaient besoin, et l'hypothèse que nous examinons n'y pourvoit à aucun degré.

Causes astronomiques. — Si les causes propres au globe terrestre se montrent impuissantes à produire le résultat cherché, c'est qu'alors il en faut chercher le principe en dehors de la terre, dans quelque facteur astronomique. Le premier auquel on ait songé est la variation de l'excentricité de l'écliptique, combinée avec celle qu'entraîne la précession des équinoxes.

Mais la seule vertu d'une influence de ce genre serait de produire des saisons extrêmes, en même temps qu'une différence considérable entre les deux hémisphères, et, plus que toute autre encore, une telle disposition serait impropre à réaliser l'uniformité thermique des temps paléozoïques.

Hypothèse de la concentration du soleil. — Toute différente est, à nos yeux, la valeur d'une conception, introduite depuis peu dans la science par M. Blandet, et qui a pour base la diminution du diamètre apparent du soleil. Nous avons pris soin de faire remarquer que la distribution actuelle des climats avait pour principe essentiel, avec l'inclinaison de l'axe terrestre, le *parallélisme des rayons solaires*. En raison de la grande distance qui nous sépare de l'astre et de la faible amplitude angulaire sous laquelle son disque s'offre à nous, malgré ses énormes dimensions, les rayons du soleil forment un faisceau

cylindrique, qui touche la terre suivant un grand cercle. Mais il en serait tout autrement si le soleil était plus dilaté, car ses rayons seraient plongeants et enveloppants, supprimant la nuit totale des régions polaires. Sans doute un soleil ainsi dilaté serait plus ou moins nébuleux et donnerait, par chaque unité de sa surface, une chaleur et une lumière moins intenses; mais la terre étant bien plus rapprochée de la périphérie de cette nébuleuse et se trouvant comme baignée dans son atmosphère, en pourrait profiter dans la même mesure qu'aujourd'hui et ainsi, pour une valeur convenable du diamètre apparent de l'astre principal, le globe jouirait d'une complète uniformité de climats.

Entretien de l'énergie solaire par la concentration. — Or cette conception qui a pu, lors de son apparition, déconcerter les esprits accoutumés au principe de la stabilité des éléments astronomiques de notre système planétaire, nous semble en accord formel avec l'idée qu'on doit se faire de la genèse de ce système. Dans l'hypothèse si plausible de la nébuleuse primitive, la terre est un fragment infiniment petit, détaché de l'astre central à l'une des époques de sa condensation progressive, et pour lequel, en raison de ses faibles dimensions, la phase stellaire a dû être extrêmement courte. Au contraire, l'énorme masse du soleil et, mieux encore, le rétrécissement graduel de ses dimensions, lui ont permis de garder, malgré le rayonnement, une provision d'énergie considérable, qui, après tant de siècles écoulés, suffit encore aux besoins extérieurs de notre globe. En dehors de cette conception, le maintien de la chaleur solaire est absolument inexplicable. En vain prétendrait-on l'alimenter par une pluie continue de météorites. Non seulement la réserve en serait bien vite épuisée; mais les astronomes ont démontré que la masse du soleil en recevrait assez d'accroissement pour que les conditions du système planétaire fussent rapidement modifiées. Une seule cause, en vertu des lois de la thermodynamique, est capable de préserver l'énergie solaire sans faire appel au concours si insuffisant du dehors, c'est le phénomène de la condensation de l'astre. Par là, le pouvoir calorifique du soleil peut se maintenir sans perte sensible, à l'aide d'une diminu-

tion de diamètre apparent, qui demanderait plusieurs milliers d'années pour pouvoir être enregistrée par nos appareils les plus délicats.

Mais si, de nos jours, le soleil, réduit comme il l'est, subit encore ce mouvement de concentration nécessaire à l'entretien de son énergie, combien ne faut-il pas qu'à d'autres époques ses dimensions aient été différentes de ce qu'elles sont aujourd'hui? Rien n'est donc plus logique que cette hypothèse et puisque, irréprochable au point de vue de l'astronomie, elle fournit seule le moyen d'expliquer le phénomène paléothermal, nous ne croyons pouvoir mieux faire que de l'accepter, en affirmant, contrairement aux doctrines de l'école *uniformitaire*, que l'histoire ancienne de notre planète s'est déroulée au milieu de conditions extérieures très différentes de celles qui nous entourent. En particulier, la formation de l'astre central, considéré comme une individualité distincte, a été certainement tardive.

§ 2

RÉSUMÉ COSMOGONIQUE

S'il reste encore en géologie plus d'un point obscur, néanmoins l'ensemble des faits définitivement acquis à la science est aujourd'hui assez considérable pour qu'on puisse, sans grande témérité, essayer de les grouper en une synthèse générale. C'est ce que nous allons faire, à titre de résumé des observations et des hypothèses que nous avons eu occasion de formuler dans le cours de cet ouvrage.

L'étude des manifestations de la dynamique terrestre nous a montré qu'en réalité il n'y avait partout que deux puissances en jeu : d'une part, la gravité ou attraction centripète; de l'autre, la chaleur, ou principe centrifuge, chaleur externe ayant sa source dans le soleil, chaleur interne emmagasinée dans les profondeurs du globe. Or ces deux éléments peuvent se réduire à un principe unique, si l'on suppose qu'à l'origine toute l'énergie de notre système planétaire ait été renfermée dans une nébuleuse, c'est-à-dire dans un amas très dilaté de matière vibrante

et lumineuse, animée d'un double mouvement de rotation et de concentration centripète. Dans ce cas, à la lumière de la thermodynamique, le mouvement de concentration nous apparaît comme une conséquence de la grande loi de la *conservation de l'énergie*, car c'est à la faveur de cette condensation qu'un système défend la provision qu'il possède contre la déperdition extérieure.

Admettant donc la conception de la nébuleuse primitive, on est conduit à diviser l'histoire terrestre en deux phases, de durées sans doute très inégales : une phase *stellaire*, très courte, pendant laquelle le globe, détaché de la nébuleuse solaire, s'est condensé, puis refroidi, jusqu'à ce que sa surface fût recouverte d'une écorce obscure; et une phase *planétaire*, qui se poursuit encore et qui est la seule dont la géologie ait à s'occuper. Le rôle de cette science commence au passage de la première phase à la seconde, alors que la réaction des fluides extérieurs sur l'enveloppe superficielle du globe va produire, dans des conditions encore mystérieuses de pression, de température et de milieu chimique, cet assemblage de couches cristallines qui forme le *terrain primitif*.

A partir de ce moment, l'activité des éléments matériels a subi sur le globe un partage définitif. Tandis que l'énergie intérieure, concentrée sous l'écorce, devait se manifester au dehors plutôt par saccades que d'une manière continue, par les dislocations de la croûte terrestre, l'énergie extérieure, ayant son principe dans l'action du soleil, combinée avec celle de la pesanteur, était destinée à subir une évolution continue par elle-même. Mais assujettie à ressentir le contre-coup des variations plus ou moins brusques de l'activité interne, cette évolution allait, elle aussi, progresser d'une manière inégale, recevant, de temps à autre, une impulsion nouvelle des phénomènes produits sous l'empire de causes profondes.

En premier lieu, l'écorce originelle, peu épaisse et mal soutenue, a dû chercher son assiette, jusqu'à ce que les premiers linéaments de la géographie du globe eussent été définis. C'est alors que sont dessinées à sa surface les zones faibles et les zones résistantes, ces dernières, sous forme d'îlots, constituant les premiers noyaux de l'*aride* ou des continents, tandis

que, dans les dépressions, s'accumulait l'élément liquide, à peine partagé en océans distincts.

Ce premier acte une fois accompli, la vie a pris possession du globe, non, à ce qu'il semble, d'une façon progressive et par une lente évolution d'organismes inférieurs, mais, autant qu'on en puisse juger, par l'apparition presque immédiate de types possédant toute la perfection que comportaient les circonstances ambiantes. De plus, ces types étaient les mêmes sur toute la surface terrestre, et si, pour les organismes marins, cette similitude s'explique, à la rigueur, par l'immense étendue et la libre communication de toutes les mers, du moins le caractère des premières flores continentales nous oblige à admettre une répartition de la chaleur et de la lumière tout autre que celle qui prévaut aujourd'hui. On a vu qu'à nos yeux cette répartition, produisant l'égalité absolue des climats, exigeait un soleil nébuleux et très dilaté.

Les débuts de la vie continentale ont été caractérisés par le règne à peu près exclusif de végétaux dont rien ne contrariait la croissance, se développant, par une température simplement tropicale, au sein d'une atmosphère humide, sans doute chargée de nuages, qui ne laissaient arriver à la terre que des rayons diffus. Les seuls animaux terrestres que cette végétation ait abrités sont de ceux dont les congénères actuels recherchent l'ombre, et l'éclat de couleurs qui fait aujourd'hui le charme de la nature n'avait à cette époque aucune raison de se manifester.

En revanche, sous l'action d'un régime particulier de pluies torrentielles, cette puissante végétation, au lieu de voir ses débris se décomposer sans profit à l'air libre, était entraînée au fur et à mesure dans des lacs ou des lagunes maritimes. Là, sous la protection de sédiments argileux, elle devait subir, presque sans perte de substance, une transformation lente, devenant de la houille, où l'homme saurait un jour retrouver, immédiatement disponible, l'énergie calorifique et lumineuse dépensée par la nébuleuse solaire durant cette remarquable époque.

Mais l'atmosphère se purifiait par le fait même de cette végétation et de son enfouissement. Les animaux terrestres apparurent, représentés par des reptiles. L'énergie intérieure, qui

s'était déjà traduite, à bien des reprises, par des éruptions profondes, où, du moins en France, la décroissance de la cristallinité semble attester la diminution progressive du pouvoir des dissolvants, devint de plus en plus apte à se manifester au dehors et aboutit à une sorte de paroxysme, qui produisit les grands épanchements houillers et permien; après quoi, le calme vint, et d'abondantes émanations, suite naturelle des éruptions, tapissèrent de minéraux divers les fentes ouvertes dans l'écorce.

Durant cette ère de paix, où le travail mécanique de la sédimentation était faible, les organismes purent s'employer, sur une échelle notable, à l'accroissement de l'écorce. C'est pendant cette période que, sur la végétation terrestre, se manifestent les premiers signes d'une différenciation des climats, c'est-à-dire d'une individualisation mieux marquée de l'astre central. Mais cette transformation est lente à se produire et, longtemps encore, les pôles vont jouir d'une température clémente. Pour que ce privilège leur soit enlevé, il faudra que, de nouveau, l'activité intérieure se réveille et, faisant émerger de grandes masses continentales, imprime à l'écorce, par une série de soubresauts successifs, ces mouvements qui porteront dans les airs les Pyrénées, les Alpes et autres grandes chaînes de montagnes. Sur le globe, enfin pourvu d'un relief qui longtemps lui avait fait défaut, les mammifères, frappés, on peut le dire, depuis leur première apparition, d'une sorte d'arrêt de développement, vont s'épanouir et se multiplier, jusqu'à ce qu'ils trouvent leur suprême expansion dans les gigantesques proboscidiens du miocène supérieur et du pliocène. A la faveur de la variété des conditions externes, la végétation revêt une ampleur et une diversité de formes jusqu'alors inconnues et fournit partout aux herbivores une abondante nourriture.

Cependant la condensation du soleil se poursuit et, avec elle, le refroidissement des extrémités polaires. A ce moment, alors que le soulèvement des grandes chaînes vient d'élever dans les hautes régions de puissants instruments de condensation, un ensemble de circonstances encore mal expliquées imprime, dans des latitudes tempérées, une activité extraordinaire aux précipitations atmosphériques. C'est l'ère des glaciers et des grands cours d'eau, où les vallées se déblayent, où les fertiles

alluvions se déposent, où les torrents, faisant l'office de pionniers et de mineurs, non seulement rendent les montagnes accessibles jusqu'à leur centre, mais stratifient, à la base de leurs déjections, les métaux précieux arrachés au quartz des filons. L'homme peut venir : la terre est mûre pour le recevoir ! c'est à lui désormais de reconnaître et de mettre à profit toutes ces richesses, si libéralement accumulées pour ses besoins, avec une prévoyance qui rend d'autant plus étroit pour lui le devoir d'en bien user !

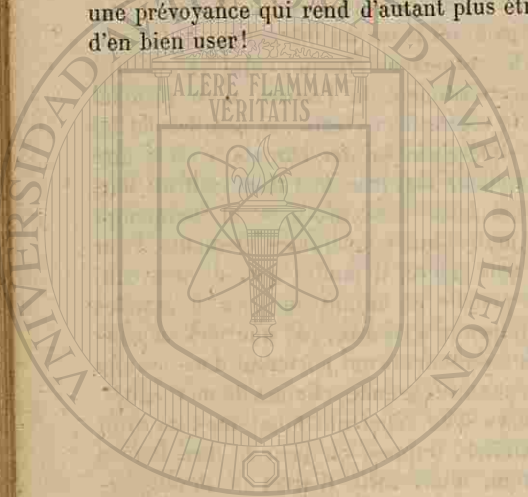


TABLEAU RÉSUMÉ

DES

PÉRIODES GÉOLOGIQUES

U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

ÈRES	PÉRIODES		ÉLÉMENTS ORGANIQUES CARACTÉRISTIQUES			DISLOCATIONS
	PRIMITIVE	CAMBRIENNE	VERTÉBRÉS	INVERTÉBRÉS	VÉGÉTAUX	
PRIMAIRE	SILURIENNE			RÈGNE DES TRILOBITES		Plissements du massif armoricain et des Ardennes.
	DÉVONIENNE		RÈGNE DES POISSONS		RÈGNE DES ACROGÈNES ET DES GYMNOSPERMES	
	PERMO- CARBONIFÈRE		RÈGNE DES LABYRINTHODONTES			
SECONDAIRE (in part.)	TRIASIQUE			RÈGNE DES AMMONITES DES BÉLEMNITES ET DES BRACHIOPODES		Ridement du Hainaut. Failles du Morvan. Invasion marine dans le golfe anglo-parisien. Emerison progressive du bassin anglo-parisien.
	LIASIQUE	SÉRIE JURASSIQUE				
	OOLITHIQUE					

ÈRES	PÉRIODES		ÉLÉMENTS ORGANIQUES CARACTÉRISTIQUES			DISLOCATIONS
	PRIMITIVE	CAMBRIENNE	VERTÉBRÉS	INVERTÉBRÉS	VÉGÉTAUX	
SECONDAIRE (in p.)	INTRA- CRÉTACÉE		RÈGNE DES DINOSAURIENS	CÉPHALOPODES A TOURS DÉROULÉS ET RUDISTES		Nouvelle immersion du bassin anglo-français. Mer nummulitique. Soulèvement des Pyrénées et des Appennins. Invasion septentrionale marine. Période des grands lacs. Mer mollassique. Soulèvement des Alpes. Apparitions des hivers. Grands glaciers Adoucissement de la température.
	CRÉTACÉE		OISEAUX REPTILIENS			
	ÉOCÈNE		RÈGNE DES MAMMIFÈRES	RÈGNE DES GASTROPODES ET DES ACEPHALES	RÈGNE DES ANGIOSPERMES	
TERTIAIRE	OLIGOCÈNE					Mer mollassique. Soulèvement des Alpes.
	MIOCÈNE					
	PLIOCÈNE					
MODERNE	RECENTE		Extinction des grands proboscidiens. Apparition de l'homme.		Flora actuelle.	

APPENDICE

APERÇU GÉOLOGIQUE SUR LA RÉGION
FRANÇAISE

§ 1

DÉVELOPPEMENT PROGRESSIF DU SOL FRANÇAIS

Le trait fondamental de la géologie française est l'existence, au centre de la région, d'un massif de terrain primitif, dont l'émersion remonte aux premiers temps de l'histoire du globe. Sans doute ce massif a subi, depuis sa première formation, de nombreuses modifications; des accidents divers en ont affecté l'équilibre, et l'érosion, poursuivie durant toutes les périodes géologiques, lui a enlevé peu à peu les éléments détritiques à l'aide desquels s'est constituée une grande partie du sous-sol de notre pays. Néanmoins, à travers toutes ces vicissitudes, son individualité est demeurée distincte et, par une sorte de prédestination, cet îlot de terrain primitif, qui devait être un jour le dernier boulevard de l'indépendance gauloise, n'a jamais cessé de former le noyau du sol français.

Aujourd'hui, si l'on fait abstraction des formations éruptives qui en recouvrent une partie, le massif primitif constitue un plateau ondulé, de 600 mètres d'altitude moyenne, qu'on appelle avec juste raison le *Plateau Central de la France* et qui comprend le Limousin, une partie du Bourbonnais, le Forez, le Velay et l'Auvergne. A ce plateau se rattachent, à titre d'annexes, au nord-est le Morvan, dont le sépare une dépression qui permet une communication facile entre le bassin de la Loire et

celui du Rhône; au sud, les Cévennes, d'une part, et la Montagne Noire, de l'autre, séparées par le golfe jurassique de l'Aveyron.

Deux autres îlots de terrain primitif doivent encore attirer l'attention: d'abord celui qui forme la Vendée et la lisière sud-ouest de la Bretagne; d'autre part, le massif de gneiss et de granite de la partie centrale des *Vosges*, ayant son symétrique de l'autre côté du Rhin, dans la Forêt-Noire, et se reliant sousterrainement au Morvan, comme en témoigne la protubérance gneissique de la *Serre*, qui surgit en Franche-Comté au milieu des terrains jurassiques. Enfin sur le littoral de la Provence, un autre îlot, celui des *Maures* et de l'*Esterel*, se révèle aussi comme un massif très anciennement émergé.

Battus par les flots des océans cambriens, ces premiers îlots ont vu se former autour d'eux une ceinture de phyllades et de grau-wackes. Les dépôts ainsi produits n'ont pas sensiblement accru l'étendue originelle du Plateau Central ni celle des *Vosges*. En revanche, ceux qui étaient venus s'adosser au versant nord de la bande primitive de la Vendée et du Morbihan, ayant été émergés peu de temps après leur formation, ont fait naître dans la mer silurienne une grande île, qui ne devait plus subir ultérieurement que des submersions partielles; c'est l'*Armorique* ou *Bretagne*, avec son prolongement naturel, la presqu'île du *Cotentin*, reliée sous la Manche à la péninsule de Cornouailles. En même temps que se produisait cette émer-sion, une autre avait lieu au nord-ouest des *Vosges*, et les mêmes sédiments cambriens, venus au jour dans l'*Ardenne* et le *Brabant*, y formaient une île, limitant au nord la région française.

A ce moment, s'est trouvé défini ce qu'on appelle le *Bassin de Paris*. Désormais le Cotentin, la Bretagne, la Vendée, le Plateau Central, le Morvan, les *Vosges* et l'*Ardenne* enfermeront, dans un cercle presque complet, une région de sédimentation dont le centre coïncide avec l'emplacement actuel de la capitale de la France. Là viendront converger les éléments détritiques enlevés par l'érosion à la partie des massifs anciens qui se déverse de ce côté, jusqu'à ce que cet apport, maintes fois renouvelé, ait rempli la cuvette parisienne et chassé la mer de

son territoire. Ainsi la France se trouvera partagée en deux régions distinctes, l'une, septentrionale, nettement délimitée en forme de bassin, l'autre méridionale, baignée par une mer largement ouverte et où les formations garderont le caractère pélagique, au moins à l'est du large détroit qui sépare le Plateau Central de la France d'un autre massif semblable, la *Meseta* de la péninsule ibérique. Un jour, dans ce détroit, la chaîne des Pyrénées fera son apparition, ramenant au jour une bande de terrains primaires, et alors on pourra distinguer dans la région française trois parties : le *Bassin de Paris*, de beaucoup le mieux développé et le plus homogène; le *Bassin de la Garonne* ou *Golfe de l'Aquitaine*; enfin le *Bassin du Rhône*, que le soulèvement des Alpes n'isolera qu'à la dernière heure des régions méditerranéennes orientales.

Si le Bassin de Paris est déjà esquissé dès la fin de la période cambrienne, du moins il ne recevra sa forme définitive que quand les sillons et les échancrures de la Bretagne, de l'Ardenne et du Plateau Central auront été comblés par les dépôts siluriens, dévoniens et permo-carbonifères. Même, à ce moment, tout ne sera pas dit encore et il faudra que la période triasique s'achève. Par là seulement cessera l'indécision par suite de laquelle, dans l'est de la France, la mer est si souvent en lutte avec la terre ferme jusqu'à la fin du dépôt des marnes irisées; si bien qu'à cette époque il est difficile de dire ce que pouvait être la condition des pays situés à l'ouest du méridien de Dijon.

Mais il n'en est plus ainsi à l'ouverture de la période liasique. Tout le bassin de Paris est inondé. Le rivage, partant du Boulonnais, longe l'Ardenne, envoie dans le Luxembourg une pointe avancée, puis se coude vers le sud le long des Vosges, jusqu'à un large détroit, séparant le massif vosgien du Morvan, et reliant la mer parisienne à la Méditerranée par l'intermédiaire d'une région mixte, celle du Jura. Du Morvan, en grande partie, sinon en totalité, immergé, le rivage se dirige à l'ouest-sud-ouest le long du Plateau Central et aboutit, entre ce dernier et la Vendée, à un autre détroit moins large, celui de Poitiers, qui établit la liaison entre la cuvette parisienne et l'Atlantique. Puis la côte se coude au nord, longe la Bretagne et le

Cotentin et, à travers la Manche, alors fermée à l'ouest, rejoint le pays de Cornouailles pour continuer sa route vers le nord de l'Angleterre.

Pendant ce temps, au delà de Poitiers, la mer liasique suit le bord sud-ouest du Plateau Central et couvre la région pyrénéenne, s'étendant jusqu'au Plateau espagnol, puis, à partir des Cévennes, son rivage, longeant le Vivarais et le Lyonnais, va rejoindre le Morvan.

A dater de la période liasique, la mer parisienne se rétrécit peu à peu, en même temps que la sédimentation y devient de plus en plus calme et finit par permettre le développement des polyptiers constructeurs, surtout au voisinage du détroit de la Côte d'Or comme de celui du Poitou. Grâce à cette retraite progressive de la mer, les sédiments couvrent de moins en moins d'espace et leurs affleurements forment, à l'intérieur de celui du lias, une série de bandes concentriques, surtout entre les Ardennes et le Berri. Plus tard, l'érosion, profitant de la différence de résistance des roches, accentuera ces zones en façonnant le bord de quelques-unes d'entre elles sous forme de falaises, destinées à jouer un rôle spécial, aussi bien dans l'orographie que dans la défense du pays.

Ce mode de dépôt des sédiments, en plaques concentriques de moins en moins étendues, se poursuit, dans la partie orientale du bassin de Paris, jusqu'à la fin des temps crétacés. Mais il n'en est pas de même dans l'ouest, où la mer de la craie, débordant les dépôts infracrétacés et même, en quelques points, les sédiments jurassiques, a laissé des témoins jusque sur le sol de la Bretagne et de la Vendée. Le détroit de Poitiers, fermé avant la fin de la période oolithique, paraît s'être ouvert de nouveau au début du crétacé. Quant au détroit de la Côte d'Or, il semble n'avoir été transformé en isthme qu'à la fin des temps oolithiques, par le fait d'une émergence qui s'étendait jusqu'au bord des Alpes, mais qui n'a pas persisté longtemps; car, à l'époque néocomienne, la mer, arrivant du sud-ouest, atteignait la Champagne et le Berri, alors que, dans le nord-ouest, les formations continentales avaient momentanément le dessus.

Lorsque la période crétacée prend fin, la mer a si bien

rétréci son domaine, qu'elle ne forme plus guère que des flaques entre Montereau et la Belgique.

Alors s'ouvrent les temps tertiaires. Pendant l'éocène, tout le Midi est soumis à un régime de sédimentation uniforme, caractérisé par les calcaires à nummulites. Les détroits de Poitiers et du Morvan sont fermés, et le bassin de Paris n'a plus de communications avec le sud qu'en contournant le Cotentin et la Bretagne.

Dans ce bassin, une série d'invasions et de retraites de la mer amène la formation d'une suite variée de sédiments. L'érosion, en enlevant les bords de ces dépôts, laissera un jour le massif éocène central se détacher en saillie, du côté de l'est, sur sa base crayeuse, mise à jour dans les plaines de la Champagne. De cette manière, le terrain tertiaire sera limité de ce côté par une falaise où l'Yonne, la Seine, la Vesle, l'Aisne et l'Oise ne pénétreront qu'en forçant de véritables défilés.

Pendant que s'effectue le remplissage de la cuvette parisienne, le pourtour voit se former, par destruction mécanique ou chimique des couches superficielles, des conglomérats de silex qui couvrent le Sancerrois, le Thimerais et une grande partie de la Normandie, de la Picardie et de la Flandre.

L'oligocène ramène la mer, venant du nord, jusqu'aux confins de l'Orléanais, pendant que l'activité thermique se traduit en Lorraine, en Franche-Comté, en Bourgogne, dans le Nivernais, le Berri, le Poitou, le Quercy, etc., par la formation des dépôts sidérolithiques. Une autre mer s'est établie dans le golfe de l'Aquitaine, que le soulèvement pyrénéen vient d'isoler de la Méditerranée, et un bras de cette mer remonte par Nantes jusqu'à Rennes.

Puis les eaux marines abandonnent le bassin de Paris, dont le grand lac de la Beauce (déjà préparé à l'époque précédente par celui de la Brie) prend possession. A la même heure, d'autres lacs occupent la Limagne, le Cantal, le Velay, le Languedoc, une partie de la Provence et de la Gascogne.

Le golfe de l'Aquitaine s'agrandit un peu à l'époque de la mollasse, lors de cette invasion helvétique qui fait arriver la mer à Blois et aux portes de Rennes, tandis que, par la vallée du Rhône, elle remonte en Suisse et jusqu'au cœur de la

Franche-Comté. Mais les Alpes se dressent à leur tour, pendant que l'Auvergne commence la série de ses éruptions. En même temps que les sommités du Cantal, du mont Dore, du Velay et du Vivarais s'édifient sur leur base de gneiss, de granite et de micaschiste, la mer essaye, dans le sud, un retour sur la vallée du Rhône, le golfe de Perpignan et la région de Montpellier. Puis elle rentre dans ses limites actuelles, et l'époque quaternaire ne la voit plus revenir sur aucune partie de notre territoire.

§ 2

RÉGIONS NATURELLES DE LA FRANCE

Par suite des nombreuses vicissitudes que la géographie française a traversées, le sol de notre pays offre, dans son relief comme dans sa composition, une grande variété. Entreprendre une description de ce sol serait sortir des limites qui conviennent à un abrégé¹. Nous nous bornerons à de courtes indications sur les principales régions naturelles, en insistant particulièrement, à cause de son unité, sur le bassin de Paris.

Au centre de ce bassin, les dépôts tertiaires forment un tout assez homogène, qui se termine, comme nous l'avons déjà dit, par une falaise du côté de l'est et du nord-est. De la sorte, en étendant un peu l'ancienne acception du mot **Ile-de-France**, on peut désigner par là toute cette grande ile tertiaire, dont le couronnement est constitué par le fond plat des anciens lacs de la Beauce et de la Brie, et au pied de laquelle les plaines de la craie, avec leurs douces ondulations, donnent en quelque sorte l'illusion d'une mer. Entre la Seine et l'Oise, la falaise tertiaire envoie par endroits de véritables promontoires, et il s'en détache des îlots pareils à des citadelles avancées, comme ceux de Laon et du mont de Berru, près de Reims. La même constitution se remarque au nord, dans le **Noyonnais**, et l'on en retrouve des traces à l'ouest, dans le **Vexin**.

A l'intérieur, l'Ile-de-France présente une composition très

1. Voir pour plus de détails notre *Géologie en chemin de fer*.

variable. Il suffit de citer le contraste du **Gâtinais français**, c'est-à-dire des environs de Fontainebleau, où une masse sableuse est encadrée entre les nappes lacustres horizontales de la Beauce et de la **Brie**, avec le **Valois**, où les sables oligocènes ne forment plus que des éminences allongées, à la surface d'un plateau éocène, entamé par des vallées rares et profondes. Tout à côté, le **Soissonnais** introduit, grâce à la nature meuble et fertile des dépôts suessoniens, un nouveau type de passage, qui comporte, avec une surface infiniment plus découpée, des niveaux d'eau plus nombreux. Enfin, le travail d'érosion quaternaire a atteint son maximum d'intensité à Paris, où la rencontre de l'Oise, de la Marne et de la Seine n'a plus laissé subsister, de l'éocène supérieur et de l'oligocène, que des *témoins*, tels que la butte de Montmartre et le mont Valérien.

Suivons maintenant, autour de l'Île-de-France, les zones concentriques que forment les affleurements de plus en plus anciens. Ce n'est pas par le sud que pourra commencer cette recherche; car, à la place où devrait apparaître la craie blanche, le lac de la **Beauce** a étendu un manteau uniforme de marnes et de calcaires, recouvert ultérieurement par une nappe de limon qui en fait un pays essentiellement agricole. Ce plateau, en raison de son âge géologique, devrait dominer tous les autres, mais il s'abaisse en pente douce vers la Loire, par l'effet du mouvement qui, à la fin de l'époque aquitaniennne, a déterminé l'assèchement du lac et la disparition de la partie méridionale de son fond sous les sables et argiles de l'**Orléanais**. De cette manière, non seulement l'Île-de-France ne se dessine pas en falaise au sud, mais il n'y a, à vrai dire, de ce côté, aucune séparation naturelle entre le bassin de la Loire et celui de la Seine.

À l'est de la Beauce, le **Gâtinais**, sous une couverture de dépôts tertiaires divers, d'origine continentale, laisse apercevoir dans les vallées la masse crayeuse. Enfin, celle-ci affleure définitivement en **Champagne**, et, depuis la vallée de la Seine jusqu'à celle de l'Aisne, demeure presque partout à découvert, formant une zone infertile, la **Champagne pouilleuse**, dont la monotonie n'est rompue que par quelques plantations de pins.

Bien que la craie se poursuive au delà de la Champagne, le caractère de ses affleurements se modifie progressivement, à mesure qu'on approche de l'ancien détroit tertiaire franco-belge. En effet, la destruction des sédiments meubles, étalés sur ce détroit aux époques suessoniennne, parisienne et tongriennne, a laissé sur la craie un manteau d'argile à silex et de limon, qui change complètement l'aspect et la valeur du sol. Il en est de même, et pour la même cause, en **Picardie** et surtout en **Normandie**, notamment dans le fertile **Pays de Caux**, où le *bief à silex* atteint parfois, sous le limon, 30 mètres d'épaisseur. Seulement, dans l'intervalle, un soulèvement spécial, celui du **Pays de Bray**, a fait naître, en déchirant la couverture crayeuse, une véritable oasis de sédiments infracrétacés et jurassiques, dont la nature se prête à merveille à la création des herbages. Du reste, grâce à la proximité de la mer et de la vallée de la Seine, le plateau normand se trouve entaillé par des vallées profondes, qui en rompent partout la monotonie.

Au sud de la Normandie, la craie est encore masquée par des argiles à silex telles que celles du **Thimerais**, desquelles on passe insensiblement à la **Beauce** occidentale du pays chartrain.

La **Sologne** cache, au sud, le turonien et le cénomaniennne, comme la Beauce avait dissimulé la craie blanche. Les deux étages se confondent plus ou moins dans l'Yonne avec la craie et ne commencent à se distinguer qu'au nord de la Marne, où la roche devient plus marneuse. Aussi, de ce côté, depuis Valmy jusqu'au delà de Rethel, la craie proprement dite se dessine-t-elle en saillie, par suite de l'érosion qui a fait disparaître la ceinture marneuse turonienne, en formant, au-devant des Ardennes, la blanche *falaise de Champagne*. Les marnes dominent encore plus au nord de l'Aisne, où les *dièves* constituent le sol plat et fertile du pays de **Thiérache**, ainsi que la haute vallée de la Sambre, dont la verdure contraste si bien avec l'aspect des plateaux picards.

Tandis que les affleurements crayeux formaient la *Champagne sèche*, ceux des sédiments infracrétacés, où domine l'élément argileux, engendrent la *Champagne humide*, région doucement ondulée, abondamment arrosée, qui commence à la

Puisaye, pour se terminer aux Ardennes, après avoir embrassé la majeure partie de l'**Argonne**.

Au delà de cette bande de bois et de prés, les affleurements oolithiques ramènent une zone calcaire et relativement aride; c'est celle qui comprend à la fois la **Champagne berrichonne**, avec ses cailloux de calcaire lithographique partout épars, une portion du **Nivernais**, une notable partie de la Haute-Marne, enfin les abords de la vallée de la Meuse en **Lorraine**, du moins au sud de Toul; car au delà le facies argileux reparait dans la grande plaine de la **Woëvre**.

La dernière bande jurassique, celle du lias, se distingue, depuis le Berri jusqu'en Lorraine, en passant par l'**Auxois** pour s'interrompre un moment dans la Côte-d'Or, par la fertilité des terres et par les formes découpées du terrain, surtout quand les plates-formes de calcaire à entroques viennent couronner les bandes de marnes liasiques.

A l'ouest, une succession analogue s'observe, mais sur de moindres proportions, entre l'embouchure de la Seine et le Cotentin. Après les herbages du **Pays d'Auge**, à sous-sol argileux formé par le jurassique supérieur, la **Champagne de Caen** et celle de la Sarthe ramènent les plaines calcaires oolithiques, en attendant que, de Bayeux à Valognes, le lias affleure avec son aspect habituel dans le **Bessin**.

Mais, dès le département de l'Orne, la transgression crétacée fait disparaître tout affleurement jurassique et l'on voit, faisant suite au **Thimerais**, deux régions de bois et de prés, le **Perche** et le **Maine**, assises sur les couches sableuses et argileuses du cénomanién. Toutes deux aboutissent, avant la vallée de la Loire, d'une part à la **Sologne** occidentale, d'autre part à la dépression de la **Touraine**, confluent de vallées au delà duquel on rejoint le Berri par la **Brenne**, région d'argiles et de sables tertiaires, supportés par un grand massif oolithique.

Portons maintenant notre attention sur la ceinture extérieure du bassin. Après la petite oasis primaire du **Bas-Bouloonnais**, les sondages de l'Artois et de la Flandre nous apprennent à suivre, sous les *morts-terrains* crayeux, le terrain houiller qui prolonge le massif ancien du Brabant et de l'**Ardenne**: cette

dernière région, haut plateau de schiste et de quartzite, couvert de bois et de landes, se soude à l'Eifel et au Hunsrück. A son pied nous trouvons le trias, si développé en **Lorraine**, où les marnes irisées constituent de vastes plaines au sol rouge, tandis que, sur les **Vosges**, les grès triasiques, relevés à de grandes hauteurs, forment des rochers pittoresques, ou des terrasses dont les contours géométriques tranchent sur les lignes adoucies des **Ballons**.

La **Côte d'Or**, par l'aspect du sol dijonnais, atteste les efforts qui ont fini par isoler le **Jura** du bassin de Paris. Franchissons-la pour arriver au **Morvan**, cet écart du Plateau Central, lardé de granites, de porphyres, de porphyrites, région de bois et de prairies, difficile d'accès et de culture.

De là nous passons au **Plateau Central** qui, malgré son apparente homogénéité, comprend trois parties distinctes: à l'ouest le **Limousin**; au centre, l'**Auvergne**; à l'est, le **Forez**, le **Beaujolais** et les **Cévennes**.

Le **Limousin** est un plateau de gneiss et de micaschistes, dont la surface est accidentée par des bosses de granite granitique, formant des massifs remarquablement arrondis. L'un des plus nets est le noyau de pegmatite de Millevaches, où tant de rivières prennent leur source. Tout le Limousin forme une région de petits bois et de maigres prairies, parfois de landes sévères et incultes, où le sol est propice au châtaignier.

L'**Auvergne** diffère beaucoup du Limousin, d'abord par l'altitude du massif primitif qui, dans l'est, finit par dépasser 900 mètres, ce qui a déterminé l'ouverture de vallées profondes et abruptes; ensuite par les changements considérables que la surface a subis par le fait des phénomènes volcaniques. Ceux-ci ont étendu sur le **Cézallier**, le **Cantal**, la **Planèze**, etc., un déluge de basalte, qui a puissamment modifié, en l'enrichissant, la nature du sol du plateau. En outre, les éruptions ont édifié, sur cette base, des cimes capables de dépasser, non seulement 1 400 mètres comme le Puy de Dôme, mais 1 800 mètres comme le mont Dore, le Cantal, le Mézenc. De là une extrême variété d'aspects et de productions, encore accrue par le phénomène qui a ouvert, entre l'Auvergne et le **Forez**, la profonde

échancrure de la **Limagne**. Les sédiments meubles de ce lac tertiaire, dispersés par l'érosion, ont laissé se former à leur place une riche et fertile vallée.

Elie de Beaumont a fait remarquer que le Cantal, avec ses profondes vallées divergentes, représentait un centre culminant de dispersion, duquel tout s'écarte, tandis qu'au contraire tout converge vers Paris. D'ailleurs la nature, qui s'est montrée si peu prodigue de ses richesses envers le Cantal, a accumulé comme à plaisir, dans la région parisienne, tous les éléments propres au développement de la civilisation, c'est-à-dire les vallées bien ouvertes, les plaines fertiles et des matériaux de construction de toutes sortes. Ainsi l'importance prise par la capitale française n'est pas un effet du hasard, et l'on peut dire que l'ensemble des conditions géographiques et géologiques la prédestinait au rôle qu'elle a joué dans l'histoire.

Du Limousin, par les plaines oolithiques du **Poitou**, on parvient en **Vendée**, où la nature du sol, jointe à l'humidité du climat marin, donne au paysage un caractère bien exprimé par le mot de **Bocage**. Cette appellation convient aussi, pour la même cause, à une grande partie du sol schisteux de la **Bretagne**, tandis que, dans la bande primitive du Morbihan, dominant les landes sauvages. Le **Cotentin** est aussi un bocage, c'est-à-dire un pays d'élevage, morcelé en prairies qu'entourent des haies vives avec de beaux arbres, de telle sorte que, vue de loin, la région offre l'aspect d'une succession de petits bois, parfois dominés par des chaînes granitiques régulières ou par des crêtes de grès armoricain.

Ce que nous avons appelé le **golfe de l'Aquitaine** offre une structure beaucoup plus simple que celle du bassin de Paris. Les zones concentriques du Plateau Central ne se dessinent que dans les **Charentes** et le **Périgord**. Encore, si la série jurassique est complète, tout l'infra-crétacé manque, et le crétacé lui-même, presque toujours recouvert de lambeaux tertiaires, dépasse à peine, dans son affleurement, le cours de la Dordogne.

Tandis que, depuis la Pointe de Grave jusqu'à l'embouchure de l'Adour, la côte est couverte par une large bande de **sable des Landes**, presque tout le bassin de la Garonne, c'est-à-dire

l'**Agenais**, l'**Armagnac**, le **Castrais**, le **Pays de Toulouse**, disparaît sous un manteau de sédiments tertiaires d'eau douce, ne laissant apercevoir qu'à l'ouest les traces de l'ancien golfe mollassique. Au sud seulement, à partir de la **Chalosse**, les dépôts éocènes nummulitiques, puis les couches crétacées, se montrent en bandes relevées le long de la grande muraille pyrénéenne, dont l'axe est formé par les sédiments primaires, entrecoupés de granite. Cette muraille présente, dans sa structure, deux régions de maximum de complication, l'une à l'ouest dans la **Navarre**, l'autre dans l'**Ariège**, à quoi il faut ajouter le massif granitique des Pyrénées orientales, qui sert d'appui au district disloqué des **Corbières**. Ce dernier est séparé par une dépression de la **Montagne Noire**, promontoire méridional du Plateau Central, limitant avec les **Cévennes** le golfe jurassique de l'Aveyron et de la Lozère. Là, les sédiments oolithiques calcaires affleurent en masses puissantes et horizontales, entaillées par de rares et profondes vallées, véritables *cañons*, et leur surface forme les plaines arides et monotones connues sous le nom de **Causses**.

Quatre régions se partagent le bassin du Rhône : le **Jura**, la **Bresse**, les **Alpes** et la **Provence**. Le **Jura** franc-comtois est formé par les couches oolithiques, en plis successifs, souvent remarquables par leur régularité, enfermant des lambeaux crétacés et, près de la Suisse, des sédiments tertiaires d'âge helvétien.

De même qu'à l'est le massif jurassien se termine brusquement, par une ligne de lacs, contre la plaine tertiaire de la **Suisse**, de même, à l'ouest, il surgit tout d'un coup au-dessus de la plaine de la Saône, vaste dépression qui prolonge la **Bresse** au nord en suivant le pied du Plateau Central. On y devine les traces d'un ancien lac pliocène qui s'étendait au sud jusqu'à Lyon, et dont la partie orientale a reçu, dans les **Dombes**, les déjections des torrents issus des grands glaciers alpins.

Tandis que le Jura est surtout une région de plissements, les cassures, les failles et les dislocations compliquées abondent dans les **Alpes**. L'effort orogénique y a fait apparaître, en larges traînées, les schistes cristallins, mais exempts des injec-

tions granitiques si fréquentes dans le Plateau Central. Relevés contre ces schistes, les dépôts jurassiques et crétacés se montrent dans le **Dauphiné**, notamment dans le massif de la Grande-Chartreuse.

Mais leur étendue diminue bien vite en **Provence**, où le morcellement et la variabilité des dépôts trahissent l'influence de l'ancien massif des **Maures** et de l'**Esterel**, recouvert dans sa partie orientale par des épanchements porphyriques d'âge permien. On sent que ce massif a dû former une île, au milieu de la mer où se déposaient les sédiments pélagiques secondaires, à l'époque où les Alpes devaient être à peine indiquées par quelques îlots.

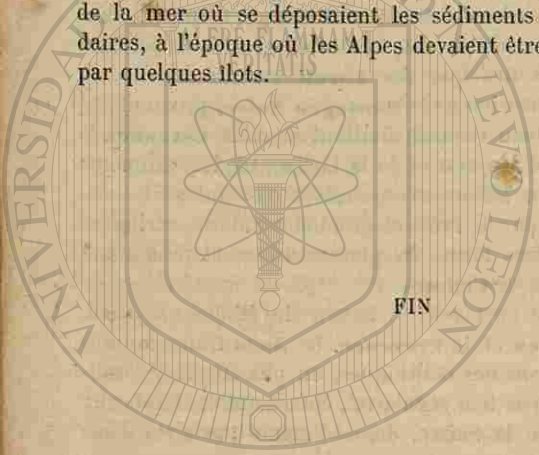


TABLE DES MATIÈRES

Introduction, p. 1.

LIVRE PREMIER

PHÉNOMÈNES ACTUELS

CHAPITRE PREMIER. — FORMES ACTUELLES DU GLOBE TERRESTRE.

- § 1. Données astronomiques, p. 4. — § 2. Relief terrestre, p. 5. — § 3. Répartition de la température, p. 10. — § 4. Répartition de la vie, p. 12.

CHAPITRE II. — DYNAMIQUE TERRESTRE EXTERNE.

- § 1. Définition de la dynamique terrestre, p. 14. — § 2. Action de l'atmosphère, p. 16. — § 3. Action des eaux courantes, p. 17. — § 4. Action de la mer, p. 33. — § 5. Action de la glace, p. 38. — § 6. Actions chimiques, p. 47. — § 7. Action des êtres vivants, p. 51.

CHAPITRE III. — DYNAMIQUE TERRESTRE INTERNE.

- § 1. Phénomènes volcaniques, p. 59. — § 2. Phénomènes thermaux, p. 72. — § 3. Géothermique. Théorie des phénomènes éruptifs, p. 78. — § 4. Mouvements de l'écorce terrestre, p. 84.

LIVRE DEUXIÈME

GÉOLOGIE PROPREMENT DITE

OU

HISTOIRE ANCIENNE DU GLOBE

CHAPITRE PREMIER. — NOTIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉCORCE TERRESTRE.

- § 1. Composition générale de l'écorce, p. 90. — § 2. Roches massives ou éruptives, p. 94. — § 3. Roches sédimentaires, p. 107. — § 4. Principes de la stratigraphie, p. 114.

tions granitiques si fréquentes dans le Plateau Central. Relevés contre ces schistes, les dépôts jurassiques et crétacés se montrent dans le **Dauphiné**, notamment dans le massif de la Grande-Chartreuse.

Mais leur étendue diminue bien vite en **Provence**, où le morcellement et la variabilité des dépôts trahissent l'influence de l'ancien massif des **Maures** et de l'**Esterel**, recouvert dans sa partie orientale par des épanchements porphyriques d'âge permien. On sent que ce massif a dû former une île, au milieu de la mer où se déposaient les sédiments pélagiques secondaires, à l'époque où les Alpes devaient être à peine indiquées par quelques îlots.

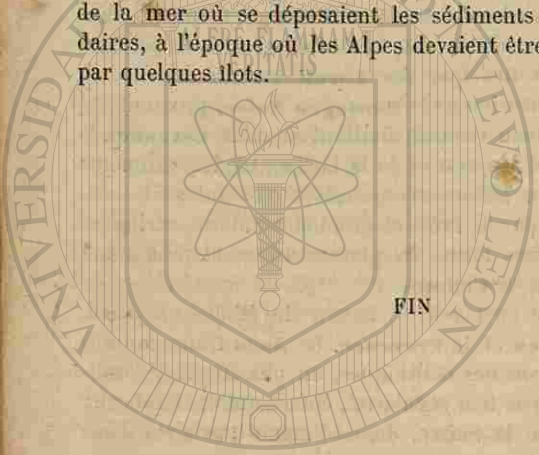


TABLE DES MATIÈRES

Introduction, p. 1.

LIVRE PREMIER

PHÉNOMÈNES ACTUELS

CHAPITRE PREMIER. — FORMES ACTUELLES DU GLOBE TERRESTRE.

- § 1. Données astronomiques, p. 4. — § 2. Relief terrestre, p. 5. — § 3. Répartition de la température, p. 10. — § 4. Répartition de la vie, p. 12.

CHAPITRE II. — DYNAMIQUE TERRESTRE EXTERNE.

- § 1. Définition de la dynamique terrestre, p. 14. — § 2. Action de l'atmosphère, p. 16. — § 3. Action des eaux courantes, p. 17. — § 4. Action de la mer, p. 33. — § 5. Action de la glace, p. 38. — § 6. Actions chimiques, p. 47. — § 7. Action des êtres vivants, p. 51.

CHAPITRE III. — DYNAMIQUE TERRESTRE INTERNE.

- § 1. Phénomènes volcaniques, p. 59. — § 2. Phénomènes thermaux, p. 72. — § 3. Géothermique. Théorie des phénomènes éruptifs, p. 78. — § 4. Mouvements de l'écorce terrestre, p. 84.

LIVRE DEUXIÈME

GÉOLOGIE PROPREMENT DITE

OU

HISTOIRE ANCIENNE DU GLOBE

CHAPITRE PREMIER. — NOTIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉCORCE TERRESTRE.

- § 1. Composition générale de l'écorce, p. 90. — § 2. Roches massives ou éruptives, p. 94. — § 3. Roches sédimentaires, p. 107. — § 4. Principes de la stratigraphie, p. 114.

CHAPITRE II. — TERRAIN PRIMITIF.

- § 1. Généralités sur le terrain primitif, p. 122. — § 2. Description du terrain primitif, p. 125.

CHAPITRE III. — ÈRE PRIMAIRE.

- § 1. Généralités sur l'ère primaire, p. 128. — § 2. Système cambrien, p. 136. — § 3. Système silurien, p. 139. — § 4. Système dévonien, p. 142. — § 5. Système permo-carbonifère, p. 145. — § 6. Mode de formation de la houille, p. 151. — § 7. Éruptions de l'ère primaire, p. 156.

CHAPITRE IV. — ÈRE SECONDAIRE.

- § 1. Généralités sur l'ère secondaire, p. 161. — § 2. Système triasique, p. 177. — § 3. Système liasique, p. 180. — § 4. Système oolithique, p. 184. — § 5. Système infracrétacé, p. 193. — § 6. Système crétacé, p. 197. — § 7. Éruptions de l'ère secondaire, p. 203.

CHAPITRE V. — ÈRE TERTIAIRE.

- § 1. Généralités sur l'ère tertiaire, p. 205. — § 2. Système éocène, p. 214. — § 3. Système oligocène, p. 219. — § 4. Système miocène, p. 223. — § 5. Système pliocène, p. 226. — § 6. Éruptions de l'ère tertiaire, p. 230.

CHAPITRE VI. — ÈRE MODERNE OU QUATERNAIRE.

- § 1. Généralités sur l'époque quaternaire, p. 232. — § 2. Description des dépôts quaternaires, p. 237. — § 3. Éruptions quaternaires, p. 241.

CHAPITRE VII. — FILONS MÉTALLIFÈRES. PHÉNOMÈNES OROGÉNIQUES.

- § 1. Filons métallifères, p. 242. — § 2. Phénomènes orogéniques, p. 246.

CHAPITRE VIII. — CONSIDÉRATIONS GÉOGÉNIQUES.

- § 1. Causes des variations de la chaleur externe, p. 253. — § 2. Résumé cosmogonique, p. 258.

APPENDICE

APERÇU GÉOLOGIQUE SUR LA RÉGION FRANÇAISE

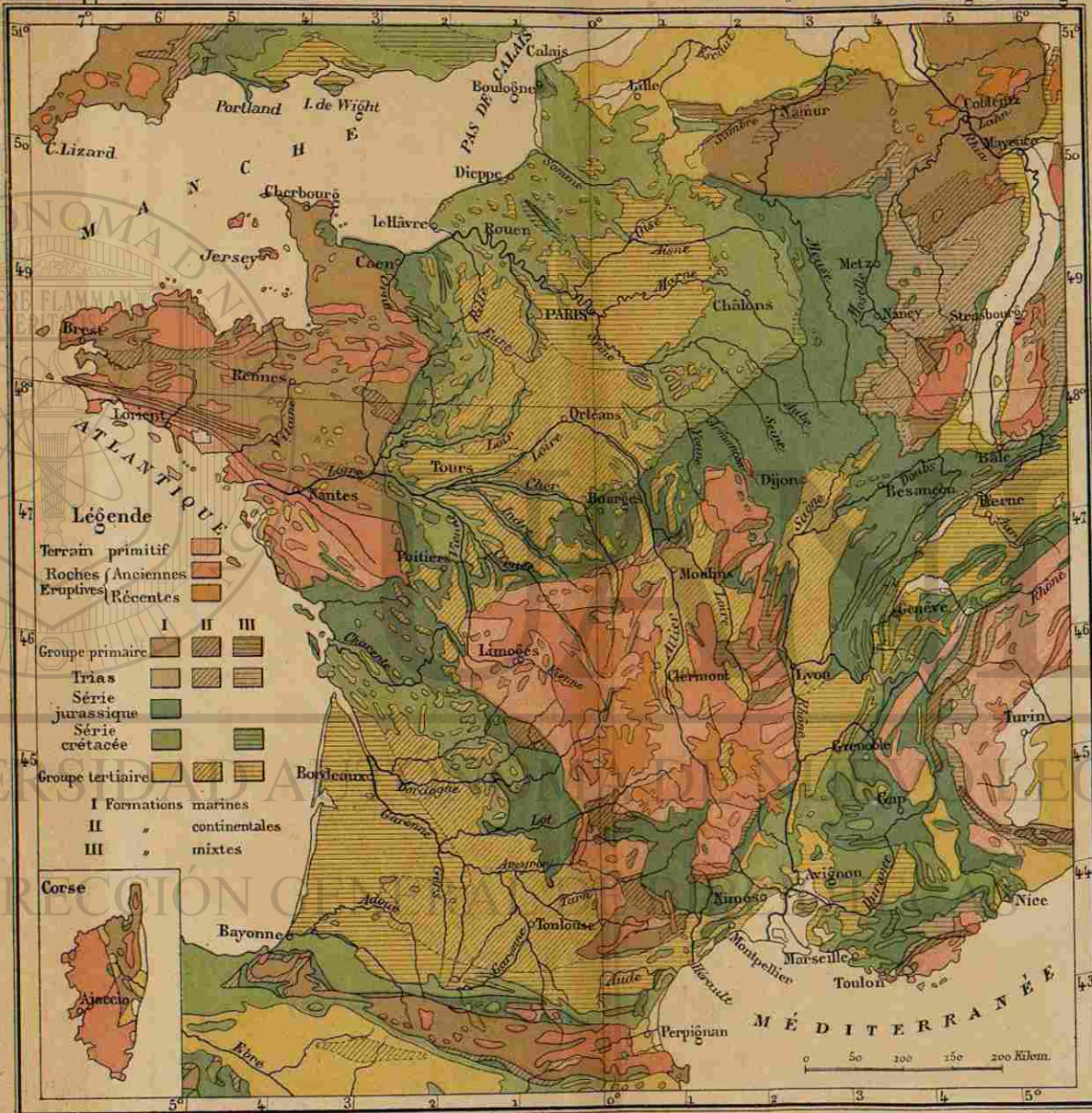
- § 1. Développement progressif du sol français, p. 266. — § 2. Régions naturelles de la France, p. 271.

Coulommiers. — Imp. PAUL BRODARD.

A. de La



Gravé chez





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
CENTRO GENERAL DE BIBLIOTECA