

LA

GÉOLOGIE GÉNÉRALE

PAR

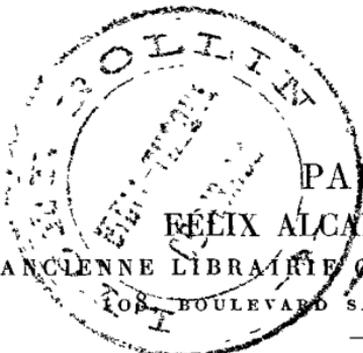
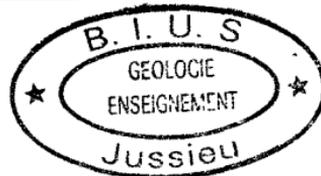
STANISLAS MEUNIER

Professeur de géologie au Muséum d'histoire naturelle.

12114

DFX

AVEC 42 GRAVURES DANS LE TEXTE



PARIS
ÉLIX ALCAN, ÉDITEUR
ANCIENNE LIBRAIRIE GERMER BAILLIÈRE & CO
108 BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 108

1903

Tous droits réservés

DF 92-11

OFFERT PAR L'ÉDITEUR

PRÉFACE

Le présent volume vient s'ajouter à la *Géologie comparée* et la *Géologie expérimentale* déjà publiées par la Bibliothèque scientifique internationale pour constituer un ensemble qui résume les points de vue principaux sous lesquels il convient de considérer la science de la Terre. Il est le résultat d'un grand nombre d'années d'études poursuivies dans des localités très diverses et qui m'ont amené à développer des idées notablement différentes de celles qui ont été le plus ordinairement adoptées. Le lecteur aura tous les moyens d'apprécier la portée des points de vue que je propose. Je veux me borner à constater ici que la plupart d'entre eux ont été d'abord développés dans mon cours du Muséum où le public leur a fait un accueil des plus encourageants. Les figures jointes au texte ont été expressément dessinées pour lui ; quelques-unes ont été insérées dans

le journal *le Naturaliste* et je me fais un agréable devoir de remercier MM. Deyrolle, directeurs de cet excellent organe, de les avoir mises à ma disposition avec le plus grand empressement.

S. M.



LA GÉOLOGIE GÉNÉRALE

INTRODUCTION

ÉVOLUTION DES IDÉES EN GÉOLOGIE GÉNÉRALE PENDANT LE XIX^e SIÈCLE

On a souvent reproché à la géologie d'être, de toutes les sciences, la plus favorable à l'éclosion des hypothèses et l'on doit convenir, en effet, que pendant bien longtemps des systèmes tout à fait fantaisistes se sont donné libre carrière dans son domaine.

Dans un rapport à l'Académie des sciences, sur un Mémoire d'ailleurs à peu près sans valeur d'un certain André (*connu, ci-devant, dit le titre, sous le nom de P. Chrysologue de Gy, capucin*¹), Cuvier a pris la peine de nous donner, pour 1806, un tableau de la géologie, qui consistait alors, suivant son expression, « en un tissu d'hypothèses et de conjectures tellement vaines et qui sont tellement combattues les unes par les autres qu'il est devenu presque impossible de prononcer son nom sans exciter le rire ».

1. 1728-1808.

L'illustre auteur, qui devait, lui aussi, malgré ce qu'il en pensait, édifier une théorie géologique dont il nous sera d'ailleurs impossible d'accepter les bases fondamentales, a écrit cependant, dans l'éloge de Saussure, ce passage remarquable : « Il faut avoir bien du courage pour résister à la tentation de faire un système : Saussure eut ce courage et nous en faisons le dernier trait et le trait principal de son éloge. »

Toutefois, personne ne saurait contester la nécessité des hypothèses, qui, même contredites plus tard par les faits, ont toujours apporté à la conquête des découvertes une collaboration décisive. « Jamais, a dit excellemment Schimper ¹, jamais la science n'a vécu et ne vivra que de faits seulement. Elle a besoin des inductions, des raisonnements, de la généralisation et c'est par celle-ci que les plus grandes découvertes se sont toujours faites. »

Depuis un certain nombre d'années, les acquisitions de la géologie ont revêtu un caractère de précision et de certitude qui contraste avec le vague et l'allure essentiellement incertaine et hypothétique des notions qui faisaient tout le bagage scientifique de nos aïeux.

Le progrès est même si considérable que nous avons le droit d'en être fier, et qu'il peut paraître assez inutile de rechercher par quelle voie il a été obtenu. Mais cela ne nous dispense pas de remarquer combien il est facile de s'expliquer le caractère hypothétique de bien des questions géologiques d'autant qu'il suffit de réfléchir un moment au nombre et à la variété des problèmes que l'étude de notre planète propose à chaque instant au géologue.

La vue du granit, roche fondamentale et prodigieusement abondante, invite à émettre des suppositions très diverses sur la date et sur le procédé de son élaboration. La coexistence dans les filons métallifères de minéraux

1. *Paléontologie végétale*, introduction, 1869, t. I, p. 76.

aussi riches en contrastes que le quartz, réfractaire aux plus hautes températures, et tel minéral qui, comme la stibine, fond dans une flamme de bougie, autorise d'abord bien des conjectures. Comment expliquer le gisement en murailles souterraines des porphyres et des roches analogues ; leur association en lits conformes à la stratification dans les houillères de l'Angleterre et du Plateau central ?

Comment interpréter la situation en pleins continents et jusque sur les montagnes les plus hautes, d'assises rocheuses, patries de coquilles si ressemblantes à celles qui vivent actuellement dans les mers ? Comment l'ardoise peut-elle avoir acquis une structure si spéciale et qui nous la rend si précieuse, tout en conservant par ses fossiles le témoignage de son origine aqueuse ?

Impartialement, on ne voit pas comment des quantités de suppositions n'auraient pas été émises sur des sujets si difficiles et comment (les moyens d'information variant d'un pays à un autre, d'après la constitution de leur sol) les différents chercheurs n'auraient pas été amenés à ouvrir entre eux et à entretenir des discussions d'autant plus vives que le motif en était plus passionnant.

Cependant, des progrès décisifs ont été réalisés dans ces derniers temps ; non seulement dans la détermination des objets géologiques, minéraux, roches, fossiles et terrains, mais aussi dans l'interprétation des phénomènes qui ont procuré au globe son état actuel.

Ces progrès résultent évidemment de la richesse, augmentée chaque jour, de nos trésors de matériaux susceptibles de comparaisons réciproques ; — mais ils sont le résultat, encore bien plus, de l'invention de méthodes de recherches beaucoup plus perfectionnées que leurs devancières.

La principale de ces méthodes, à laquelle une vraie rénovation est due, quant à la conception de la terre et du monde, consiste même dans l'application la plus large des procédés comparatifs.

C'est elle qui recherche parmi les manifestations géologiques actuelles des termes analogues à la série des phénomènes qui ont laissé le témoignage de leur activité dans l'épaisseur de la croûte terrestre.

Elle a conduit à l'édification d'une doctrine connue sous le nom d'Actualisme.

On lui a opposé bien des objections et chacune de celles-ci lui a été bien utile ; car on peut dire qu'elle a converti plus ou moins complètement presque tous ses anciens adversaires, même parmi ceux qui ne s'avoueraient pas volontiers à eux-mêmes ce changement d'opinion.

Grâce à elle, nous avons de l'origine et de l'évolution de la Terre une idée qui satisfait l'esprit, parce qu'elle rentre dans le cadre universel des harmonies naturelles telles que nous les ont fait sentir les études de détail.

Et quand on l'a étudiée, on s'étonne qu'il puisse y avoir encore contre elle des résistances, si faibles qu'elles soient.

On peut la résumer en disant que le moment où nous vivons, où nous étudions la nature, ne se distingue par aucun caractère géologique essentiel de ceux qui l'ont précédé et qu'il constitue un simple chaînon dans le temps. La démonstration peut en être faite de la manière la plus complète.

Pour comprendre qu'il y ait encore lieu de la faire, il faut se reporter en arrière et se demander comment nous avons acquis les notions que nous possédons maintenant.

L'histoire de ces progrès successifs est une des plus captivantes que l'on puisse rencontrer et son étude jette des lumières en dehors du cadre d'une science, même des plus vastes, considérée en particulier.

Il faut, pour en trouver les débuts, se reporter par la pensée au moment même de l'apparition de l'homme sur la Terre.

L'homme, en ouvrant les yeux, pour ainsi dire, — a

éprouvé deux besoins aussi impérieux l'un que l'autre et à la satisfaction desquels il a immédiatement consacré toutes ses énergies ; manger et comprendre le monde ; c'est-à-dire, en somme, nourrir son corps et nourrir son esprit.

Psychologiquement, il est bâti de telle sorte qu'après avoir constaté un fait, et bien souvent même avant de l'avoir étudié, il remonte instinctivement à la conception d'une cause, et c'est le secret de toute son histoire.

Même, cette promptitude à tout expliquer ne se borne pas au domaine physique ; elle s'applique sans plus d'hésitation et sans changement aucun aux faits qui ressortissent au monde intellectuel et même au monde moral.

De sorte que c'est d'une manière absolument artificielle qu'on prétend parfois faire des catégories dans nos connaissances, qui nous viendraient de sources différentes, selon qu'elles sont du domaine de la science, ou de celui de la philosophie, ou de celui enfin de la révélation.

Le procédé qui nous les a procurées est le même, et ce qui change, c'est seulement l'objet sur lequel il s'est exercé.

Les religions sont des sciences morales qu'on prétend, et d'ailleurs bien en vain, soustraire à tout progrès ultérieur.

La vue d'un bâton de cire frotté qui attire des brins de paille suscite l'idée d'une cause qui sera une *force physique* (l'électricité) ; — le remords d'un criminel, la satisfaction d'un homme qui a rempli son devoir, provoquent l'idée d'une cause qui sera la *conscience* ; — l'harmonie de la nature, sa puissance et sa sérénité vis-à-vis de notre faiblesse et de notre inquiétude, conduit à l'idée d'une cause qui sera *Dieu*.

Dans tous les cas, qu'il s'agisse des faits les plus généraux ou des détails les plus menus, l'homme se comporte de même ; et il l'a fait dans tous les temps, dans tous les pays, à tous les degrés de son évolution sociale. Les

formes changent, mais le fonds reste rigoureusement le même.

Dans cette recherche des causes cachées, certains esprits sont plus clairvoyants que d'autres : ils ont ce qu'on nomme communément des *inspirations*, ce sont des *génies*, même quand ils se trompent en partie, voire en totalité, dans leurs conjectures. La révélation n'est qu'une forme spéciale de l'inspiration, caractérisée par la nature des considérations auxquelles elle s'applique.

Chaque peuple aussi a mis le sceau spécial de son caractère particulier dans les conceptions qu'il a inventées, et les rencontres de détail, parfois très frappantes, s'expliquent par l'uniformité du sujet considéré et par les traits généraux de la tournure de l'esprit humain.

La place nous manquerait, et elle serait d'ailleurs employée sans bénéfice direct pour notre sujet, si nous voulions résumer les diverses hypothèses cosmogoniques. Il suffira de rappeler quelques traits essentiels des plus célèbres d'entre elles, non point pour les juger en elles-mêmes et comparer leur valeur relative, mais pour nous pénétrer de ce fait qu'elles sont *scientifiques*, en ce sens qu'elles constituent des tentatives d'interprétation de faits plus ou moins correctement observés.

Dans les plus vieux textes, le monde est souvent comparé à une créature quelconque et on le fait procéder d'un germe ou d'un œuf. Dans les premières philosophies hindoues, et l'incubation qui en dure plus de trois trillions d'années, ne fait que refléter l'hyperbolisme oriental. On retrouve la même conception chez les Persans et chez les Syriens.

L'œuf originel se retrouve même chez les Grecs : Orphée le chante et Porphyre raconte qu'un œuf, représentant le monde, figurait dans une cérémonie des *Dyonisiaca*, décrite par Aristophane.

On sait que l'œuf de Brahma se divisa en deux parties, dont l'une fut le ciel et l'autre la terre. De même pour

lés Egyptiens, le ciel et la terre, d'abord mélangés, se séparèrent ; et de son côté, l'œuf d'Orphée, après l'incubation de son père Hercule, se rompit également en deux parties dont l'une s'arrondit sous la forme du ciel pendant que l'autre devint la terre.

A côté de cette application au grand problème économique du fait observé de l'incubation de l'œuf à l'origine des êtres, on peut citer celle, du même ordre de question, de la conjugaison, du dualisme qui revient à chaque pas.

Ainsi, chez les Phéniciens, on voit, au début, la collaboration d'un esprit aérien et fécondant et d'un chaos épais et sombre. Pour Hésiode, c'est l'union du ciel avec la terre qui donne naissance à la mer ; et en somme, on rencontre ordinairement dans cette série des tentatives d'explication de l'origine du tout, par un mécanisme plus ou moins analogue à celui qui donne naissance aux détails, c'est-à-dire à des objets dont l'observation est vulgaire.

Il ne faut d'ailleurs pas oublier que très fréquemment ces doctrines passent à l'état de dogmes, par suite du caractère social de ceux qui les enseignent et par suite aussi de la forme même de leur enseignement.

Alors, on peut facilement se méprendre sur leur origine et c'est de là qu'est venue cette idée d'une *science divine* qui serait différente de la science humaine et qui, à l'inverse de la science proprement dite, échapperait à tout contrôle.

Toutefois, on peut reconnaître, en une série de circonstances, que des chapitres de cette science divine se sont incorporés insensiblement dans la science proprement dite ; la mesure des dimensions du monde et spécialement des profondeurs de la mer est dans ce cas. N'est-il pas dit aux versets 2 et 3 de l'*Ecclésiaste* :

« Qui a compté le sable de la mer, les gouttes de la pluie et les jours du monde ? Qui a mesuré la hauteur du ciel, l'étendue de la mer et la profondeur de l'abîme ?

« Qui a pénétré la sagesse de Dieu ? etc. »

Certains auteurs ont employé beaucoup de temps et dépensé beaucoup d'ingéniosité à chercher dans les observations scientifiques la confirmation des traditions, et Deluc est du nombre, à l'antipode de Buffon qui reproche à Whiston d'avoir pris « les passages de l'Écriture pour des faits de physique et pour des résultats d'observations astronomiques ». Fournet raconte comment Brochant de Villiers, ému un jour des impossibilités qui surgissaient devant son esprit désireux de retrouver tous les détails de la cosmogonie de Moïse dans les résultats de la géologie, s'adressa à l'abbé Frayssinous, qui fit du cas le sujet d'un sermon.

L'interprétation, nous n'en saurions douter, fut cette fois, comme dans tant d'autres circonstances analogues, parfaitement satisfaisante ; et il n'y a à retenir de ces incidents, que le peu d'utilité pratique de ces anciennes cosmogonies qui, supposées rigoureusement exactes, ne peuvent être sagement comprises qu'au prix des mêmes efforts qui eussent suffi pour découvrir scientifiquement les notions qu'elles prétendent enseigner.

A cet égard, il est très intéressant de constater qu'au contraire, le contrôle est parfois possible et fournit un résultat très profitable même aux chapitres qu'il ne saurait élucider directement.

Pour le bien sentir, il faut commencer par noter que le seul procédé d'information dont les hommes ont disposé au début, et qui est le simple témoignage de nos sens, nous procure ordinairement des informations inexactes.

Il y a dans ce fait une disposition très singulière qui ne peut être le résultat du hasard et où on serait tenté de voir un effet de la prévoyance providentielle, cachant à l'homme faible et désarmé de l'origine les véritables et sévères conditions de sa demeure terrestre.

Quoi de plus légitime que le sentiment que l'homme conçoit bientôt de son importance dans la nature qui l'environne, puisqu'il la dompte et la fait servir à la satis-

faction de ses besoins ? Peu à peu, il rattache tout à lui-même et se voit au centre de toutes choses : la forme de l'horizon encourage cette illusion ; la terre est faite pour l'homme ; chacun de nous est un peu Chinois, en ce sens qu'il habite « l'Empire du Milieu ».

Et le même point de vue s'étend fatalement à la conception de la Terre : elle aussi est le centre de tout et tout a été créé pour elle. Cette locution instinctive, « le Ciel et la Terre », exprime les deux parties d'un tout, dont l'une est faite pour l'autre.

De même, le témoignage des sens nous apprend que la Terre est plate et immobile et que le ciel tourne au-dessus d'elle : c'est même le type des *évidences*, et cette remarque serait bien faite pour provoquer des réflexions salutaires à l'égard des évidences de tous genres en présence desquelles nous nous trouvons si fréquemment dans des directions incontrôlables.

Du reste, la conclusion uniforme de toutes ces apparences est essentiellement flatteuse pour l'homme : la petite dimension du monde justifie le projet de construction de la tour de Babel ; la solidité du ciel, consacrée par son nom de firmament, en fait la charpente toute proche du monde ; les dieux sont tout voisins, préoccupés des actes des hommes, mêlés à eux à chaque instant.

Toujours la même conclusion : le monde a été créé pour l'homme ; celui-ci est le couronnement et le chef-d'œuvre de la création ; avant sa venue, les choses traversaient une période de préparation ; maintenant qu'il est là, la nature est arrivée à son but final ; c'est la stabilité succédant aux temps d'établissement.

Faut-il, au lieu de cela, rappeler en deux mots ce que nous a enseigné l'application de la méthode scientifique ? Quand Galilée nous révèle que, loin d'être le centre du monde, la Terre tourne autour du Soleil dont elle est un simple satellite, il y a dans ce seul fait un renversement complet du sentiment précédemment rappelé quant à

notre importance personnelle ; aussi comme s'explique bien la résistance qu'il a provoquée !

Depuis cette première manifestation si libératrice de la méthode scientifique, les conquêtes du même genre se multiplient chaque jour. Le fait que la Terre n'est pas seule de son espèce, mais qu'elle fait partie d'une famille planétaire, a des conséquences imprévues ; et il en est de même de cette autre vérité que le Soleil, malgré son rôle spécial à notre égard, n'est qu'une étoile entre des myriades d'autres dont rien d'essentiel ne le distingue.

Ce n'est plus par le sentiment que nous apprenons la distance des cieux ou la grosseur des astres et ce n'est plus affaire de fantaisie que d'égaliser ou non la surface du Soleil à celle du Péloponèse : nous savons procéder dans l'espace céleste à des mesures précises. Le résultat n'a aucun rapport avec les évaluations primitives et si nous trouvons que certaines étoiles, comme la 1830^e de Groombridge, sont à plus de 900 000 milliards de kilomètres, si bien que sa lumière met 170 ans à nous parvenir, nous savons aussi que ces distances mesurables ne concernent « que nos voisins célestes ». La grande multitude des astres qui brillent dans notre ciel sont bien trop loin pour que nous puissions même essayer d'évaluer leur distance.

Et comme si ce n'était pas assez, les observations nous révèlent cet autre fait que toutes les étoiles de nos constellations, y compris le Soleil, sont englobées dans un même ensemble sidéral, à côté duquel il y en a des milliers d'autres dans les profondeurs de l'espace. C'est une nébuleuse que nous appelons la Voie lactée, à cause de l'apparence que sa traînée nous procure en projection sur la voûte céleste ; et la conclusion de toutes ces études merveilleuses qui, seule entre plusieurs, s'impose au point de vue de nos études spéciales, c'est que le sentiment primitif sur les rapports de la Terre avec le reste du monde était aussi inexact que possible.

A la place de ce plateau circulaire immobile recouvert d'une cloche hémisphérique bleue portant les astres, nous sommes contraints de concevoir l'espace sans limite, renfermant, à des distances prodigieuses les uns des autres, ces nuages lumineux que nous appelons les nébuleuses. Chacune de ces nébuleuses est formée de millions de globes que rien d'essentiel ne distingue de notre Soleil ; ce sont les étoiles. Notre Soleil est perdu dans l'une quelconque de ces nébuleuses, la Voie lactée, qui nous apparaît suivant les directions, sous les deux apparences peu différentes mais facilement conciliables, de traînée lumineuse et de constellation. Enfin notre Terre gravite avec une famille d'astres comparables à elle autour du Soleil, sans manifester aucun trait spécial, n'étant ni la plus grosse ni la plus petite, ni la plus rapprochée, ni la plus éloignée du centre, etc.

Ce sont là, répétons-le, de profondes différences avec les conceptions premières : les notions qui semblaient évidentes, au-dessus de toute contestation, étaient toutes fausses, sans une seule exception.

Et ces erreurs initiales sur la place de la Terre dans le monde, sur la forme et la dimension de l'univers, ont leurs pendants exacts dans le domaine chronométrique. Les temps employés à la création n'ont aucun rapport avec ceux qu'on avait cru d'abord légitime de lui attribuer. Et ici, comme dans les domaines précédents, nous pouvons démontrer la fausseté des vues *primitives* sans pouvoir remplacer ces notions détruites par des notions certaines. De même que nous sommes incapables de dire la dimension du monde, de même nous ne savons pas dire son âge. Seulement nous savons de source certaine qu'on s'était profondément mépris à ce dernier point de vue comme au précédent.

Notre certitude est étayée sur la découverte faite un grand nombre de fois de localités qui ont bien mérité le nom qu'on leur a donné de *chronomètres naturels*, puisque

les phénomènes s'y inscrivent d'eux-mêmes et conduisent par conséquent à un résultat final absolument indépendant des préférences de celui qui l'observe.

LE CATACLYSMISME

CUVIER ET SON ÉCOLE

Il est bien facile de s'imaginer par quelle suite logique de raisonnements on est arrivé à concevoir le système des révolutions du globe. Les deux causes principales ont été, d'une part, la différence apparente de l'époque actuelle et des époques passées — et d'autre part l'opinion préconçue sur le peu d'ancienneté de la terre. En les combinant, comme il était nécessaire de le faire, ces deux circonstances devaient amener la supposition d'une très grande énergie chez les agents géologiques.

Dans son célèbre *Discours sur les révolutions du globe*, Cuvier ne laisse aucune doute à cet égard. Par exemple il écrit (p. 6 de l'édition de 1825): « Lorsque le voyageur parcourt ces plaines fécondes où des eaux tranquilles entretiennent par leur cours régulier une végétation abondante et dont le sol foulé par un peuple nombreux, orné de villages florissants, de riches cités, de monuments superbes, n'est jamais troublé que par les ravages de la guerre ou par l'oppression des hommes au pouvoir, il n'est pas tenté de croire que la nature ait eu aussi ses guerres intestines et que la surface du globe ait été bouleversée par des révolutions et des catastrophes. »

Vient ensuite le contraste entre cette stabilité actuelle et les accidents du passé. Et il faut voir sur quelle longueur d'observation est fondée la croyance à cette stabilité actuelle: « Depuis 3 000 ans, constate E. Bertrand¹, rien

¹ *Histoire naturelle de la terre et des fossiles*, p. 39.

n'a été changé dans la géographie de la Basse-Égypte, et par conséquence la Terre n'a pas subi de si grands changements que l'on suppose. »

Elie de Beaumont mettait un véritable *hiatus* entre les temps anciens et les temps actuels, par sa considération d'ailleurs si injustifiée de l'époque des deltas, des dunes et des cratères ; et il reliait de la manière la plus nécessaire ses opinions sur l'âge multiple des soulèvements des montagnes aux idées de cataclysmes détruisant tous les êtres animés¹. Suivant lui, même nos phénomènes les plus violents, comme les tremblements de terre les plus meurtriers, ne déterminent aucun changement durable de la surface terrestre et cette opinion si incroyable a été professée jusque dans ces dernières années par la grande majorité des géologues. La conclusion était évidemment que les mouvements antérieurs du sol tiennent à une cause différente de celles que nous voyons à l'œuvre et qui n'agit plus : « Le *statu quo* dont nous jouissons, dit Vézian, n'a pas toujours existé ; il est la conséquence du calme momentanément des forces intérieures². »

D'un autre côté, profondément imprégné des enseignements tirés de la « révélation », on s'attacha à attribuer à la durée du monde un temps très court. Dolomieu, applaudi sans réserve par Elie de Beaumont³ écrivait en 1793⁴ : « Je compte me servir des atterrissements du Nil et de leur peu d'étendue, pour soutenir mon opinion sur le peu d'ancienneté de l'état actuel de notre globe et pour rapprocher de nous l'époque du dernier cataclysme, contre le sentiment de plusieurs hommes illustres. »

En 1806, ce Chrysologue dont nous parlions tout à l'heure exprimait l'état de l'opinion générale : « Il a fallu, dit-il, une

1 *Annales des sciences naturelles*, 1^{re} série, t. XIX, p. 226. — *Géologie pratique*, p. 520.

2. *Prodrome de géologie*, t. I, p. 327.

3. *Leçons de géologie pratique*, p. 517.

4. *Journal de physique*, t. XLII, p. 47.

cause générale, uniforme, violente et prompte pour arranger la surface de la Terre comme elle l'est à présent... Quoi ! des pyramides, des obélisques taillés et isolés sur les hauteurs ; des cirques de 2 lieues de diamètre, creusés dans les montagnes, et les uns et les autres de 1 200 toises de hauteur ; des vallées de 7 à 8 lieues de large, creusées à 1 000 toises de profondeur ; tous leurs débris, ou presque tous, balayés, enlevés et transportés à 20, 30, peut-être 100 lieues plus loin ; et surtout des blocs énormes placés sur des montagnes étrangères à 4 ou 500 toises au-dessus des vallées actuelles : quelle force prodigieuse ne fallut-il pas dans la cause qui produisit tous ces effets surprenants ! Quelle promptitude étonnante pour enlever toutes ces matières, sans en presque laisser, au pied des obélisques ni sur le revers des montagnes voisines ! »

Pour apprécier la valeur des arguments mis en avant, il faut se rappeler les principales « preuves » que l'observation paraissait fournir à la doctrine des révolutions du globe.

Cuvier (*loc. cit.* p. 7) signale tout spécialement la présence de coquilles marines dans les continents et il en conclut que la mer a éprouvé des changements soit en étendue soit en situation.

Il voit ensuite des traces de révolutions plus imposantes quand il s'approche du pied des grandes chaînes : les couches qui contiennent les coquilles ne sont plus horizontales mais s'élèvent sur le flanc des montagnes.

« Ainsi, conclut-il (*loc. cit.* p. 11), la mer avant de former des couches horizontales, en avait formé d'autres, que des causes quelconques avaient brisées, redressées, bouleversées de mille manières. » D'ailleurs ces révolutions ont nécessairement été nombreuses. « On comprend (*loc. cit.* p. 13) qu'au milieu de telles variations dans la nature du milieu, les animaux qu'il nourrissait ne pouvaient demeurer les mêmes ; leurs espèces, leurs genres mêmes, changeaient avec les couches. »

A la suite de ces deux premiers ordres de preuves (coquilles dans les continents et couches fossilifères redressés) on citait le volume de certains blocs rocheux évidemment charriés par les eaux. « Dolomieu, dans le mémoire déjà cité, expose qu'il avait d'abord cru que les gros blocs des Alpes transportés jusque sur le Jura avaient été entraînés par les rivières voisines, lors de crues extraordinaires ; mais, après avoir examiné le poids énorme de ces blocs, le grand trajet qu'ils avaient parcouru, et la hauteur où ils se trouvent isolés, il reconnut que « les eaux de rivières étaient trop faibles pour cela et d'autant plus que même dans les plus fortes crues elles n'auraient jamais pu parvenir jusqu'à la hauteur des endroits où ces blocs étaient en grande quantité et par conséquent que leur transport appartenait à des moyens révolutionnaires absolument étrangers au cours ordinaire de la nature : moyens qui, en détruisant tous les lieux circonvoisins, avaient fait disparaître le sol sur la pente duquel une forte impulsion les avait fait rouler. »

Une considération peut-être encore plus forte en faveur de la doctrine des révolutions du globe fut mise en avant par Cuvier dans le mémoire qu'il lut à la séance tenue par l'Institut de France le 20 janvier 1796 pour démontrer que l'éléphant fossile appartient à une espèce perdue, différente de celles des éléphants actuels. C'était en même temps la première manifestation publique des travaux destinés, comme on le sait, à renouveler la zoologie et à créer la paléontologie.

C'est de ce jour que fut vraiment fondée la doctrine des révolutions du globe ; la formule en fut bientôt donnée. « Je pense avec MM. Deluc et Dolomieu, dit Cuvier à la page 282 de son célèbre Discours, *que s'il y a quelque chose de constaté en géologie, c'est que la surface de notre globe a été victime d'une grande et subite révolution dont la date ne peut remonter au delà de cinq ou six mille ans... Mais les pays aujourd'hui habités et que la dernière*

révolution a mis à sec, avaient déjà été habités, sinon par des hommes, du moins par des animaux terrestres ; par conséquent une révolution précédente au moins les avait mis sous les eaux ; et si l'on peut en juger par les différents ordres d'animaux dont on y trouve les dépouilles, ils avaient peut-être subi deux ou trois irrutions de la mer »... « Mais ce qu'il est aussi bien important de remarquer, c'est que ces retraites répétées n'ont point été lentes, ne se sont point faites par degrés : au contraire, la plupart des catastrophes qui les ont amenées ont été subites. Et cela est surtout facile à prouver pour la dernière qui par un double mouvement a d'abord inondé et ensuite remis à sec nos continents : elle a laissé encore dans les plaines du Nord des cadavres de grands quadrupèdes que la glace a saisis et qui sont conservés de nos jours avec leur peau, leur poil et leur chair (*loc. cit.* p. 17). »

Le succès de la doctrine des révolutions du globe fut universel : c'est sans doute à des causes multiples qu'il faut l'attribuer, et par exemple à la conformité de ce point de vue avec l'esprit général des traditions ; — sans compter, ce qui cependant n'est peut-être pas absolument négligeable, la haute situation sociale de son auteur et la séduction du style qu'il a mis au service de ses idées.

Introduisant dans cette question de science pure des procédés qui sont plus ordinairement de mise dans d'autres domaines, on a été quelquefois jusqu'à contester les textes les plus formels de façon à nier presque le différend, au moment où on ne pouvait plus soutenir l'opinion qu'on avait défendue jusque-là.

Cuvier a écrit : « Le fil des opérations est rompu, la marche de la nature est changée ; et aucun des agents qu'elle emploie aujourd'hui ne lui aurait suffi pour produire ses anciens ouvrages. »

Personne ne s'y est trompé à l'époque, pas plus Constant Prévost que Lyell, et cependant Ch. Sainte-Claire Deville a contesté le sens de cette déclaration si formelle.

« Quand Cuvier a écrit, dit-il, qu'aucun des agents que la nature emploie aujourd'hui ne lui aurait suffi pour produire ses anciens ouvrages, il a entendu évidemment aucun des agents employé dans sa forme et dans son expression actuelle. »

Vraiment, on n'en croit pas ses yeux. Comme si Cuvier, ce maître en l'art d'écrire, n'aurait pas su exprimer sa pensée clairement ! Et comme s'il n'aurait pas rétabli son texte en présence des objections que celui-ci soulevait et spécialement de la part de Constant Prévost !

D'ailleurs Cuvier n'aurait pas eu raison davantage avec la forme abâtardie qu'on lui prête si gratuitement.

Les dissidents furent d'abord très rares ; Cuvier ne daigna pas leur répondre et plutôt les écrasa sous les affectations d'une bienveillance hautaine. La masse des auteurs se fit gloire de fournir, par des conclusions de détail, des appuis à la doctrine triomphante, et ce fut le même spectacle auquel nous assistâmes nous-mêmes bien plus récemment à propos du réseau pentagonal, auquel un mémoire quelconque de géologie se croyait tenu de donner, en manière de conclusion, une confirmation nouvelle.

Nous sommes d'autant plus autorisé à ce rapprochement qu'Élie de Beaumont en 1830 appuya l'opinion de Cuvier de la manière la plus absolue. Pour lui, il y a lieu de distinguer dans l'histoire de la Terre les périodes d'accumulation tranquille et progressive de chacun des dépôts de sédiments et les périodes de violence, relativement passagères, et qui ont établi des lignes de démarcation entre les dépôts consécutifs. Encore en 1869, Louis Agassiz affirme sa croyance aux révolutions du globe et sans assurer qu'il soit le dernier en date, on peut reconnaître qu'il fut l'un des plus formels : « Ce que révèlent les faits, dit-il', ce n'est pas la disparition graduelle d'un petit nombre d'espèces et l'introduction également graduelle

1. *De l'espèce et de la classification en zoologie*, p 164 (1869).

ST. MÆUNIER. — Géol. gén.

d'un nombre correspondant d'espèces nouvelles ; c'est au contraire la création simultanée et la destruction simultanée de faunes entières, et la coïncidence entre ces révolutions du monde organique et les grands changements physiques que la Terre a subis. »

Mais n'anticipons pas.

Les révolutions étant prouvées et admises, on en perfectionna l'étude et, chose bien curieuse, quoique le perfectionnement eût été réalisé d'abord avec une vraie ferveur, il eut peu à peu un résultat directement contraire à la cause qu'il prétendait servir ; de sorte que la doctrine cataclysmienne aurait succombé entre les mains de ses partisans, même si elle n'avait pas eu d'adversaires.

Ceci mérite un mot d'explication.

Actuellement, tout le monde est unanime pour reconnaître qu'il faut profondément modifier les idées premières sur ce qu'on peut appeler le *mécanisme de la création*, surtout en ce qui touche au mode d'apparition des êtres vivants à la surface de la terre.

En effet, à côté de l'antiquité des origines dont nous avons vu la certitude, il y a lieu de reconnaître la continuité des phénomènes.

Dans les vieilles idées, le présent diffère du passé par le calme propre à une période définitive, contrastant avec le trouble des temps antérieurs qui constituent des périodes de préparation. Les fossiles apparaissent d'abord comme des preuves de convulsions et confirment la supposition d'un déluge universel, séparant précisément le temps préparatoire de l'état définitif aujourd'hui réalisé.

Il est même très curieux de rappeler que les premières découvertes scientifiques accentuent ce point de vue faux ; Giraud-Soulavie, dès 1777, Cuvier et ses émules, démontrent que les animaux fossiles diffèrent des animaux actuels et conduisent à l'idée de deux créations successives, l'une *antédiluvienn*e, l'autre actuelle.

Bientôt Alex. Brongniart et Smith arrivent presque simultanément à la reconnaissance des faunes caractéristiques des diverses formations géologiques et la conséquence de cette découverte immense c'est qu'il y a eu plus de deux créations.

Alcide d'Orbigny se saisit du fait comme d'un moyen de classification stratigraphique et il se préoccupe avant tout de le justifier :

« En résumé, écrit-il, pourquoi veut-on, par esprit de système, donner des entraves à la puissance créatrice ? Pourquoi veut-on empêcher la nature de reproduire à diverses reprises, dans les âges du monde, des formes analogues sinon identiques ?... En vérité cette affirmation serait trop exagérée. »

Et l'illustre paléontologiste en vient à admettre la succession de trente-trois révolutions qui successivement auraient amené la destruction de tous les êtres vivants. « Nous avons pu conclure de nos recherches, dit-il ¹ que la limite des terrains et des étages était la même pour toute la terre... Nous avons adopté ces étages avec d'autant plus de certitude qu'ils n'ont rien d'arbitraire, et qu'ils sont au contraire l'expression des divisions que la nature a tracées à grands traits sur le globe entier. »

Il n'y eut aucune opposition et par exemple Dufrénoy fit le 20 mars 1843 devant la Société géologique, la profession de foi que voici ² : « Toute formation est séparée de la précédente et de celle qui la suit par une révolution du globe. Cette révolution amène la cessation complète des formations sédimentaires et de l'action ignée ; puis les actions sédimentaires recommencent ensuite par des transports. Ce sont, d'abord, des amas considérables de poudingues composés de galets souvent énormes et soudés ensemble ; puis des grès à gros grains, des grès à grains fins,

1. *Paléontologie stratigraphique* p. 38.

2. *Bulletin de la Société géologique de France*, 1^{re} série, t. XIV, p. 329.

des grès micacés ; puis des argiles qui sont des grès à parties imperceptibles ; puis des marnes, des calcaires argileux et enfin des calcaires parfaitement purs, que ces calcaires proviennent de sources ou d'animaux. »

Toutefois, le nombre même de ces révolutions créa contre elles des résistances, et bien des savants furent d'avis qu'on s'était laissé aller trop loin et qu'il fallait restreindre la série des cataclysmes et des créations réparatrices. En 1860, Deshayes, dans la préface de son grand ouvrage sur les animaux sans vertèbres du bassin de Paris, expose les raisons qui le portent à penser qu'en définitive il n'y a pas eu trente-trois révolutions comme le voulait Alcide d'Orbigny, mais seulement cinq révolutions séparant les unes des autres les époques géologiques d'importance exceptionnelle.

Mais ces cinq révolutions perdirent peu à peu et successivement de leur évidence ; de tous les côtés on fut frappé de soudures locales entre des formations qui ailleurs semblaient si nettement séparées.

Par exemple, le terrain primaire se soude au terrain secondaire dans des pays où, comme dans la chaîne des Vosges, on ne met guère que d'une manière artificielle une limite entre les grès permien et les grès bigarrés. Ailleurs c'est entre les terrains secondaires et les terrains tertiaires que l'union se révèle.

Deshayes mettait une de ces révolutions entre le crétacé et l'éocène ; mais voilà qu'aux États-Unis, Marcou, Delafontaine et leurs successeurs signalent des couches très épaisses où les faunes crétacée et tertiaire sont intimement mélangées. Chez nous-mêmes, le D^r Lemoine extrait du tertiaire inférieur de Reims les *Plesiadapis*, *Adapisorex*, *Neoplagiulax*, que Marsh avait découverts dans le crétacé des environs de Fort-Laramie.

Il faut répéter les mêmes remarques pour les rapports mutuels du terrain tertiaire et du terrain quaternaire. Les mastodontes qui sont tertiaires en Europe sont quater-

naires aux États-Unis et bien plus, les coquilles abyssales de la Méditerranée jettent un pont entre le pliocène et les temps actuels, par-dessus tout le quaternaire.

D'un autre côté, et ceci est tout aussi troublant que les remarques précédentes, on découvre que là où dans la série stratigraphique paraît exister une destruction et une re-création pour l'un des deux règnes organiques, il peut n'y avoir au contraire aucune circonstance analogue à noter pour l'autre règne : ce qui est inexplicable dans l'idée des révolutions.

Ainsi, s'il paraît légitime aux zoologistes de faire une coupure primordiale entre le secondaire et le tertiaire au sommet de la craie, la paléobotanique au contraire n'indique à ce moment rien de particulier. Et, à l'inverse, à l'époque cénomaniennne qui, zoologiquement, est un moment quelconque, il y a substitution aux vieilles flores, de la légion des Angiospermes, ce qui, botaniquement, est un phénomène incomparable.

Il fallut donc revenir à l'idée d'une seule création, mais sans reproduire pour cela le premier point de vue, puisqu'il apparut que cette création est d'essence bien différente de celle qu'on avait imaginée d'abord. Au lieu de constituer un phénomène de très courte durée relative, suivie d'un repos qui durerait encore, c'est une manifestation continue, sans trêve, encore agissante.

Chaque espèce organique se présente comme ayant une histoire propre qu'on dirait calquée sur celle de chacun des individus qui la composent. Elle apparaît, s'accroît, puis décline avant de s'éteindre. Elle peut disparaître à un moment où règnent les conditions qui sont le plus favorables à des espèces tout à fait analogues. Elle semble avoir simplement épuisé la provision de vitalité dont elle avait été pourvue à l'origine et meurt, comme nous voyons mourir un vieillard, dans le milieu où prospèrent au même moment des êtres semblables à lui mais qui sont plus jeunes.

D'ailleurs les découvertes de la paléontologie avaient, d'autre façon encore, porté une atteinte très grave aux idées de d'Orbigny en montrant que bien des espèces, contrairement à la doctrine cataclysmienne, passent d'un terrain à terrain suivant.

De tous les côtés se multiplient les preuves que la disparition des espèces est indépendante de changements considérables dans le milieu ou de perturbations dans l'économie ordinaire de la nature.

En somme, on arrive à reconnaître que là où l'on voyait une séparation dans la série stratigraphique il y a simplement une lacune temporaire comblée en un point plus ou moins voisin.

On peut donc dire qu'il n'y a qu'un seul terrain depuis l'origine de la sédimentation jusqu'à nos jours ; ou plutôt qu'il y a deux terrains dont le développement est pour ainsi dire parallèle et dont les termes peuvent s'enchêtrer réciproquement, l'un qui est d'origine marine, pendant que l'autre est d'origine lacustre. Par exemple, l'intercalation apparente en tant de lieux du terrain houiller à végétaux terrestres entre le terrain carbonifère et le terrain permien, marins l'un et l'autre, s'explique par un incident local, dont on ne trouve pas le moindre vestige dans d'autres points où, au contraire, la liaison est si intime entre les deux formations marines que l'on a proposé sérieusement pendant un certain temps d'instituer un terrain *permo-carbonifère* !

L'UNIFORMITARISME

LYELL ET SON ÉCOLE

Au moment où Cuvier obtenait le plus de succès avec l'exposé de sa doctrine cataclysmienne, c'est-à-dire en 1825, Constant Prévost fit paraître un mémoire dont voici

la conclusion : « Autour de nous, soit sur la terre, soit sous les eaux, soit au sein et dans le voisinage des volcans, il se produit des phénomènes dont les causes ne diffèrent pas essentiellement de celles qui, dans les temps plus ou moins éloignés, ont successivement donné les divers états géologiques. »

C'était la première protestation contre l'enseignement officiel ; elle précéda de plusieurs années la publication des *Principles of Geology* de Charles Lyell où les mêmes idées sont développées, et où l'auteur, comme notre compatriote l'avait énergiquement proclamé, s'attache à montrer qu'il n'y a nulle part une limite tranchée entre la nature ancienne et la nature actuelle.

Déjà cependant, en 1802, à la page 83 de son *Hydrogéologie*, Lamarck avait pour ainsi dire protesté d'avance contre la supposition des révolutions du globe. « Les seuls catastrophes, dit-il, qu'un naturaliste puisse raisonnablement admettre comme ayant pu avoir lieu, sont les catastrophes partielles et locales, celles qui dépendent de causes qui n'agissent qu'en des lieux isolés ; tels sont les bouleversements qui sont causés par les éruptions volcaniques, par les tremblements de terre, par des inondations locales, par de violents ouragans, etc. »

Et avant encore, Hutton affirmait qu'on ne saurait voir dans le monde ni les traces d'un commencement, ni la menace d'une fin.

Ici se présente ce point de vue tout spécial mais qui, repris par Lyell, va être la pierre angulaire de toute la doctrine *uniformitariste*. On sait que Hutton avait pris pour base de sa *théorie de la Terre* le renouvellement continu des continents ; Playfair est le vulgarisateur de cette doctrine que son auteur avait exposée avec beaucoup d'obscurité, et Ch. Lyell est le continuateur direct de Playfair.

Lyell, en effet, refuse de s'occuper des premiers âges de la Terre et l'on ne peut qu'être frappé de cette restriction vraiment antiphilosophique. Même, son opinion sur les

« causes lentes » conduisait tout droit à l'opinion aristotélique que la Terre est éternelle.

Il s'attache à démontrer que les terrains dont la Terre est formée se sont faits comme nos sédiments actuels ; en s'enfonçant par suite de leur recouvrement sous des masses plus récentes, ils cristallisent, deviennent du granit et même les laves des volcans, qui par la désagrégation reforment la substance de nouveaux sédiments. De sorte que la Terre est le théâtre d'un éternel recouvrement.

Lyell dut se défendre du reproche de matérialisme comme l'avait fait Hutton avant lui dans des circonstances toutes pareilles.

L'ACTUALISME

CONSTANT PRÉVOST ET SON ÉCOLE

L'uniformitarisme, dont nous venons de nous occuper, met en valeur, en définitive, l'ensemble des phénomènes qu'on rattache d'ordinaire aux *causes actuelles* et il n'y a pas lieu de rappeler à cet égard les véritables jeux de mots auxquels s'est livré Ch. Saint-Claire Deville pour contester à cette doctrine son vrai caractère¹.

C'est aussi ce point de vue des causes actuelles qu'adopte Constant Prévost, dont nous notions tout à l'heure la courageuse protestation contre les enseignements de Cuvier ; mais il y ajouta des considérations éminemment fécondes.

Remarquons d'ailleurs que l'attention prêtée aux causes actuelles remonte historiquement très haut. On a quelquefois regardé Aristote comme le père de la théorie des causes actuelles et, de fait, il pensait qu'on peut attribuer tous

1. *Coup d'œil historique sur la géologie et les travaux d'Élie de Beaumont* Paris, 1878.

les phénomènes passés aux mécanismes en ce moment à l'œuvre, pourvu qu'on leur accorde une durée prodigieuse.

Sans rechercher si ce point de vue a été repris dans l'intervalle, il convient de noter que Hutton est parti de ce principe que les causes qui modifient encore aujourd'hui partiellement l'écorce terrestre suffisent pour expliquer les révolutions du globe aux époques les plus reculées.

Lamarck compte parmi les plus illustres défenseurs du point de vue actualiste et Ch. Lyell, malgré ses opinions particulières, est de tous les vulgarisateurs de la géologie celui qui a le plus contribué à populariser la doctrine actualiste. D'Omalius d'Halloy, Desnoyers, Michelin, Buignier, d'Archiac sont des actualistes et, comme on le voit, s'il suffisait de réunir le suffrage de grands savants, l'actualisme pourrait opposer une cohorte qui en serait digne au groupe formé par Cuvier, Barrande, Elie de Beaumont, d'Orbigny, Hébert, Ch. Saint-Claire Deville, Belgrand.

L'actualisme, tel que Constant Prévost l'a formulé, c'est en somme un synonyme de l'*évolutionnisme terrestre*. Pour lui, chaque moment de l'histoire du globe est la conséquence des moments antérieurs et le déterminant des moments suivants. Elle écarte les accidents généraux mais ne préjuge pas l'intensité des phénomènes et en outre, ce qui la distingue très nettement du point de vue de Lyell et des uniformitaristes, elle fait intervenir son coefficient d'âge pour chaque période. La Terre a eu un commencement, elle parcourt les phases d'un développement continu et dès lors les diverses époques successives, quoique liées entre elles, peuvent arriver à différer beaucoup les unes des autres. Chacune d'elles, je le répète, a comme son coefficient propre qui donne un caractère spécial aux effets des causes permanentes.

Les progrès du refroidissement séculaire sont à mentionner en première ligne comme déterminant cette évolution et Buffon déjà pensait que les mêmes causes sont moins efficaces maintenant que par le passé, parce que. à

l'origine, la croûte du globe avait moins de consistance, était moins tassée et devait moins leur résister ¹.

D'ailleurs il faut noter que parmi les auteurs plusieurs se plurent à faire une distinction entre ce qu'ils appelaient les *causes lentes* et les causes actuelles : le résultat fut un peu plus d'imprécision sur la question. On doit reconnaître qu'il peut à chaque instant, sous l'influence de causes lentes, se faire en certaines régions de la masse terrestre une accumulation d'efforts — et que ceux-ci peuvent à un moment donné se manifester par un cataclysme local, quand la limite de résistance du récepteur de ces efforts se trouve atteinte ou dépassée.

Il semble qu'une pareille remarque devrait être superflue.

L'ACTIVISME

SON CARACTÈRE DISTINCTIF ; SA PORTÉE

On verra dans l'exposé qui va suivre que nous adoptons pleinement la doctrine actualiste qui nous semble la seule raisonnable et dont les faits d'observation et d'expérience renouvellent la démonstration tous les jours. C'est dire que nous admettons que les divers traits de l'écorce terrestre se sont produits aux diverses époques comme se produisent des traits analogues, encore aujourd'hui et sous nos yeux.

Mais il importe beaucoup de montrer que le point de vue actualiste a laissé de côté tout un grand côté de la question dont la considération doit conduire à une interprétation beaucoup plus saine de l'économie de la Terre.

Déjà on a admis depuis bien longtemps qu'il peut se produire des modifications secondaires dans un massif une

1. Buffon, 2 vol., I, 66.

fois constitué. Toute la doctrine du métamorphisme est fondée là-dessus et les phénomènes d'épigénie, c'est-à-dire de transformation de substance dans les roches et dans les minéraux, en sont comme des cas particuliers.

Seulement on a toujours attribué soit aux phénomènes du métamorphisme, soit aux épigénies, une époque particulière pour chaque cas, à laquelle leur production doit être rattachée. Un sédiment s'est déposé avec de certains caractères ; une éruption rocheuse l'a traversé et il est devenu métamorphique. Un minéral avait cristallisé ; une source thermale est venue le baigner et il a été épigénisé, etc.

Ce qu'il faut mettre en lumière c'est que, tout au contraire, l'ensemble de ces transformations est *absolument continu* ; c'est que dès qu'un dépôt est formé, et même pendant qu'il se forme, la matière qui le compose subit des changements.

Elle obéit à des attractions intestines qui l'arrangent de certaines façons, elle éprouve de la part des fluides qui la traversent une série de réactions rappelant involontairement les phénomènes qui dans un tissu vivant résultent de la circulation au contact des cellules du liquide qui les baigne. Dans les deux cas, il y a perte et acquisition de matières et peu à peu la masse change ses molécules initiales pour des molécules nouvelles : en somme l'épaisseur des roches se comporte comme s'il était le théâtre de phénomènes comparables à ceux qui caractérisent la vie des organismes. Aussi, et bien contrairement à ce que l'on supposait d'abord, y a-t-il bien des chances pour que les éléments aujourd'hui constitutifs d'une couche donnée, jurassique par exemple, soient pour l'immense majorité au moins d'un tout autre âge que cette couche. Jusqu'ici on a toujours supposé qu'une couche ferrugineuse provient du bassin de sédimentation qui était ferrugineux lui-même ; or, il y a bien des cas, beaucoup plus nombreux qu'on ne croirait, où il n'en est rien ; où tout le fer de la

couche a été acquis très postérieurement au moment de son dépôt et n'est aucunement lié par conséquent aux conditions initiales de la formation.

Nous n'avons pas à démontrer ces faits ici car ils vont se présenter à nous sous des formes variées et vont nous fournir une foule de considérations. Disons seulement que ce point de vue nouveau qui vient ajouter à l'actualisme sa vraie signification nous a paru mériter une appellation spéciale : nous le qualifions d'*activisme*.

Je sais bien qu'à première vue cette doctrine ne semble guère nouvelle et que tout le monde est d'avis qu'il se fait aujourd'hui en certains pays des dissolutions, ou des oxydations, ou des égrugements de roches de tous les âges.

Mais on ne saurait méconnaître que dans l'esprit de la plupart des géologues, les accidents offerts par une couche sont de l'âge même de cette couche, et il nous sera utile d'y insister un instant.

Ainsi, les géologues étudient, à la porte de Saint-Étienne, la si curieuse colline de Saint-Priest, dont les roches fossilifères sont entièrement quartzieuses : leur opinion est que ces couches témoignent à l'époque carbonifère de sources siliceuses très abondantes, mélangeant leurs eaux aux plantes encore vivantes, maintenant enfouies dans le sol. C'est la répétition du cas des meulières parisiennes, où M. Eugène Robert, à son retour d'Islande, voulait voir le témoignage de geysers éocènes dans le nord de la France.

Il en est de même pour les craies phosphatées de Beauval et des pays analogues. M. Lasne a décrit les conditions de la mer sénonienne où, suivant lui, l'apatite se concrétionnait sur les fucus ballottés par les flots.

MM. Gosselet et Barrois expliquent les lits de *coquins* des Ardennes par des galets phosphatés roulés par la mer albienne ; or nous savons maintenant que l'origine de ces nodules est tout autre, et suppose des séries de concrétions lentes, de dénudations et de sédimentations souter-

raines, qui se sont continuées pendant des périodes entières.

Le minerai de fer oolithique de Lorraine donne lieu au même résultat. M. Georges Rolland, d'accord avec la majorité des géologues, pense que la mer toarcienne déposait de la limonite que le remous des eaux rendait oolithique. L'histoire réelle du gisement s'est révélée comme étant beaucoup plus compliquée. Pour le sable quartzeux de Rilly, Hébert allait jusqu'à admettre que le lac de Rilly a été le théâtre de phénomènes amenant chimiquement la précipitation de la silice!

Ces exemples, qu'on pourrait multiplier, suffisent pour montrer qu'il est bien légitime de dire que le point de vue activiste est fort méconnu.

Or il y a lieu certainement de le mettre en valeur, et j'espère montrer que nous arriverons ainsi à jeter sur plusieurs questions géologiques un jour tout à fait imprévu.

L'Activisme, qui constitue à l'heure actuelle le dernier stade dans l'évolution des idées en Géologie générale, fera-t-il place à quelque doctrine plus perfectionnée? Sans aborder la question, je constate que son éclosion est liée de la manière la plus intime à l'ensemble des hypothèses qui l'avaient précédée : c'est là le point sur lequel il semble surtout utile d'insister. En effet, s'il pouvait paraître plus séduisant à première vue de rechercher des faits nouveaux que de constater les voies qui nous ont procuré les résultats acquis, en y réfléchissant, on reconnaît bien vite que l'histoire de la science renferme un enseignement éminemment profitable par lui-même à la conquête de nouvelles découvertes.

PLAN DE L'OUVRAGE

Si l'on a bien compris l'esprit général du tableau qui vient d'être tracé de l'évolution des grandes doctrines

depuis le commencement du XIX^e siècle, on concevra la nécessité de recenser, au point de vue où nous sommes parvenus aujourd'hui, les notions désormais acquises. Il convient en effet de soumettre le procédé auquel chacune d'elles est due à une critique inspirée précisément par la nécessité de faire intervenir dans l'interprétation des faits les enseignements historiques.

La méthode qu'il paraît indiqué de suivre dans ce but consistera à passer en revue les principaux phénomènes actuels, en essayant pour chacun d'eux de retrouver la cause prochaine d'où il dérive.

Nous aurons ensuite à rechercher dans les dépôts des époques antérieures à la nôtre des témoignages analogues à ceux qui auront été ainsi interprétés ; à voir si toutes les actions actuelles se sont fait sentir alors, et si à leur influence ne s'est pas ajoutée celle de causes qui n'agiraient plus maintenant.

Ces deux séries d'études nous permettent d'établir pour ainsi dire la physiologie tellurique de l'époque actuelle et la physiologie comparée des époques précédentes.

Il n'y aura plus qu'à faire ressortir entre l'une et l'autre les points communs et les contrastes, pour que toute la philosophie de la géologie se dégage comme d'elle-même de nos études.

PREMIÈRE PARTIE

CARACTÈRE PHYSIOLOGIQUE DES GRANDS PHÉNOMÈNES GÉOLOGIQUES ACTUELS

L'examen des phénomènes géologiques qui sont en voie d'accomplissement sous nos yeux à la surface de la Terre ou dans les régions accessibles de son écorce, amène l'esprit d'une façon insensible à la considération d'une véritable physiologie tellurique.

On y observe en effet des phénomènes de caractères très divers qui se neutralisent pour ainsi dire les uns les autres, remettent sans cesse en l'état, soit de situation, soit de constitution des matériaux qui sont sans répit déplacés et modifiés. Ces phénomènes, dont le résultat général est le maintien d'une sorte d'équilibre mobile du milieu, sont très variés, autant par les causes spéciales dont ils dérivent directement que par les résultats auxquels ils donnent naissance.

Les classer est difficile et dans tous les cas la classification adoptée peut être critiquée, ce qui vient de ce que, loin d'être essentiellement distincts les uns des autres, ils sont au contraire très intimement unis entre eux, de façon à présenter presque sans exception des caractères ambigus par rapport aux divisions théoriquement adoptées.

Ce qui paraît le plus simple, c'est de distinguer des catégories d'après la nature de la force initiale motrice des phénomènes.

Parfois ils sont la conséquence de la haute température des régions internes du globe terrestre.

D'autres fois ils dérivent de l'attraction qui émane de ces mêmes régions souterraines et que nous appelons la pesanteur.

Souvent enfin, ils ont leur cause dans la chaleur et dans la lumière irradiées du Soleil.

Qu'il s'agisse de l'une ou de l'autre de ces catégories nous trouvons à distinguer pour chacune d'elles des phénomènes qui sont surtout mécaniques et qui se traduisent avant tout par des déplacements de matière, et des phénomènes qui sont surtout chimiques et se traduisent par des arrangements nouveaux des substances unies en composés plus ou moins caractéristiques de chaque condition particulière.

Dans la série des phénomènes héliogènes c'est-à-dire engendrés par le Soleil, on ne pourra que souligner tout un ordre de manifestations dont la cause immédiate réside dans l'activité biologique des animaux et des plantes.

Toutefois, la description des phénomènes classés d'après le centre d'où émane l'énergie qui les met en marche ne saurait être poussée bien loin sans de très grandes difficultés. C'est un trait essentiel de l'organisme terrestre que les catégories qui viennent d'être établies sont unies mutuellement de la façon la plus intime, si bien qu'en voulant les séparer on ferait perdre à chacune d'elles des détails qu'elles possèdent en propre.

Nous sommes d'ailleurs ici en présence, il faut bien le reconnaître, d'une condition qui se trouve réalisée dans la physiologie proprement dite où aucune des grandes fonctions ne peut être étudiée complètement indépendamment de toutes les autres.

Pour ce qui nous concerne, les exemples seraient faciles à accumuler de la liaison dont il s'agit : les volcans par exemple sont au premier chef des conséquences de la haute température souterraine et cependant la coulée des laves, l'accumulation des lapilli et des cendres sont causées par l'action de la pesanteur. Une partie de leurs caractères se rattachent à l'activité solaire et surtout si les variations de l'état de l'atmosphère ont, comme on l'a soutenu, quelque influence sur leur allure.

La conséquence de ces remarques, c'est qu'après avoir défini les centres de dynamisme géologique dont nous avons parlé nous devons nous préoccuper de retrouver, pour les décrire, les *mécanismes* physiologiques dont la réunion constitue tout l'organisme tellurique.

CHAPITRE PREMIER

LES CENTRES DE L'ACTIVITÉ GÉOLOGIQUE ACTUELLE

1 — LA CHALEUR PROPRE DU GLOBE COMME CENTRE D'ACTIVITÉ GÉOLOGIQUE

Nous n'avons pas à insister outre mesure sur le fait de connaissance vulgaire que les profondeurs terrestres sont imprégnées d'une chaleur qui leur est propre, c'est-à-dire d'une chaleur initiale, et non soumise aux vicissitudes saisonnières comme la chaleur qui nous arrive du Soleil.

On trouve dans les vieux auteurs des quantités de témoignages en faveur de l'opinion qu'il existe réellement une source calorifique très intense dans les entrailles du sol. Les éruptions de l'Étna et du Vésuve ont sans doute donné naissance au mythe du Pyriphlegeton, fleuve de feu circulaire dont les laves sortant des bouches des volcans étaient les émissaires. Platon y voit en effet la cause des éruptions volcaniques : « C'est le fleuve qu'on appelle le Pyriphlégeton, dont les ruisseaux embrasés saillent sur la terre partout où ils trouvent une *issue* » (Phédon). Simplicius, dans son commentaire sur les ouvrages d'Aristote, rapporte que les plus instruits des Pythagoriciens attribuaient au *feu central* (μέσον πῦρ) une action géogénique, en le plaçant à l'intérieur de la Terre, comme le principe créateur de la vie et des choses, comme une sorte de chaleur éternelle pour le globe, exposé d'ailleurs au refroidissement.

Un certain nombre de géologues, bien pénétrés du sentiment que nous sommes à une époque de stabilité définitive, ont défendu cette opinion que la Terre est dès maintenant complètement refroidie, et parvenue dans toute sa masse à une température correspondant à celle de sa superficie. C'est par exemple le sentiment de Breislak¹ qui s'appuie sur les résultats prétendus uniformes de mesures thermométriques faites dans les mines à diverses profondeurs.

Il peut être intéressant de constater que le système de Hutton s'est appuyé sur la chaleur interne du globe, avant même que la réalité de cette chaleur ait été constatée d'une manière incontestable. On n'avait encore que les observations bien vagues rapportées par Kircher en 1664, sur la haute température des mines et les remarques faites à Giromagny en 1749 par l'ingénieur Gensanne.

Buffon résume l'état de la question à son époque, en disant que « la chaleur interne propre du globe nous est démontrée par la comparaison de nos hivers et de nos étés ; et on la reconnaît d'une manière encore plus palpable, ajoute-t-il, dès qu'on pénètre au-dedans de la Terre ; elle est constante en chaque lieu, pour chaque profondeur et elle paraît augmenter à mesure que l'on descend. »

C'est d'ailleurs en grande partie comme une application de la théorie de Fourier sur la propagation de la chaleur dans les corps que la théorie de la chaleur interne a été établie.

Pour comprendre l'importance de ces conclusions, il faut remarquer que dans les cosmogonies de Leibnitz et de Buffon, le feu intérieur de la Terre est supposé n'avoir agi que dans l'origine du globe, avant la formation des terrains. Descartes fut le premier à considérer la chaleur propre de la planète comme un agent géologique permanent.

1. *Introduction à la géologie* (1812), p. 107.

Il est indispensable de passer en revue très rapidement les phénomènes actuels qui paraissent dériver du foyer interne de chaleur et qui nous en révèlent l'existence. En première ligne on doit mentionner les volcans, et il faut constater que ceux-ci nous démontrent la réalité de hautes températures émanant des profondeurs mêmes, en laissant de côté les conséquences théoriques qu'on a voulu en tirer sur le siège et sur l'intensité de cette chaleur.

Ce qui nous suffit pour le moment, c'est de constater que tout ce qui sort des volcans est chaud et que les traits essentiels des matières volcaniques n'ont pu leur être procurés que par l'application d'une température très élevée.

Le premier fait à rappeler à cet égard c'est la sortie des cratères au moment des éruptions, de vapeur d'eau à une très forte tension. Le bruit des explosions n'est même pas aussi éloquent pour nous le prouver que le fait pur et simple de l'ascension des laves jusqu'à 2 000 et 3 000 mètres au-dessus du niveau de la mer, comme on l'observe par exemple à l'Etna ; jusqu'à 6 000 comme au Cotopaxi.

La même énergie centrifuge se révèle encore par les projections de vapeur d'eau et de cendres jusqu'à des hauteurs considérables dans l'atmosphère. On a dans cette direction évalué la quantité d'eau qui sort des volcans sous la forme de gaz rapidement condensé : l'Etna en rejette parfois en une seule journée plus de 20 000 mètres cubes.

On peut à cet égard rappeler que Woodward admet déjà l'intervention de la chaleur interne pour faire sortir du vaste abîme une certaine quantité d'eau ; après avoir produit les sources et les fontaines, cette eau s'évapore dans l'atmosphère et retombe en pluie, alimentant le réservoir intérieur.

En diverses circonstances on a mesuré au moins d'une manière approximative la hauteur égale à 6, 8 ou

10 kilomètres des colonnes de « cendres » lancées verticalement au-dessus des orifices volcaniques.

Déjà Pline avait donné de ce phénomène une description qui est restée célèbre.

Pour être fidèle à notre principe, qui consiste à contrôler dans la mesure du possible les résultats de l'observation par des essais de reproduction synthétique, je dirai que des expériences de laboratoire donnent le moyen d'imiter le « pin d'Italie » de Pline et dans des conditions qui sont peut-être plus fécondes en conséquences qu'on ne l'imaginerait tout d'abord. Elles conduisent en effet à reconnaître que pour appliquer sûrement, à l'interprétation des phénomènes de la nature, les lois découvertes par les physiiciens, il faut savoir les combiner réciproquement et parfois avec une complication extrême.

Ainsi, nous sommes très au courant des lois de l'ébullition et nous savons, par exemple, qu'une masse liquide ne peut bouillir que lorsqu'elle est tout entière portée à une certaine température réglée par la nature du liquide et par la valeur de la pression de l'atmosphère qui lui est superposée.

Or, il semble bien que ce principe, qui est cependant incontestable, ne saurait suffire à l'interprétation des phénomènes naturels, et qu'il peut se faire que dans une enceinte donnée l'équilibre des températures ne soit pas toujours aussi bien réalisé qu'on le suppose d'habitude. Et c'est probablement à cette circonstance qu'il faut attribuer certains détails dans l'allure des explosions volcaniques.

Par exemple, si l'on met sur un fourneau à gaz un ballon rempli d'eau, on voit le liquide s'échauffer progressivement par conduction et par circulation, et c'est quand toute la masse a atteint la température de l'ébullition que les bulles de vapeur commencent à se former.

Mais, au lieu d'eau pure, mettez dans le ballon de l'eau renfermant en suspension une certaine quantité d'argile

extrêmement fine, celle, par exemple, qu'on a obtenue par l'attaque aux acides d'un calcaire un peu argileux. Si on attend pour allumer le fourneau que la matière argileuse se soit déposée au fond du ballon, on voit que l'allure du phénomène est tout à fait changée.

Au bout d'un temps très court, il se fait dans la masse argileuse, au-dessus de chacune des flammes du gaz une production de vapeur, alors que la température de la masse liquide générale n'a pas été sensiblement modifiée. Cette vapeur présente le caractère explosif et elle lance verticalement de bas et jusqu'à plusieurs centimètres de hauteur de petites nuages de boue au travers de l'eau immobile.

C'est avec tout autant de certitude que nous tirerions les conclusions précédentes de l'observation des jets de vapeur qui sortent du sol en maintes localités avec une violence qui témoigne de la forte tension des régions souterraines. En Toscane, où ces jets sont connus depuis longtemps sous le nom de *soffioni*, on a fait à leur égard des séries d'observations importantes.

On retrouve des jets analogues dans bien d'autres régions comme en Nouvelle-Zélande et au Parc national des États-Unis.

C'est à la suite des *soffioni* que les geysers doivent être cités comme attestant, avec une évidence égale, la violence des énergies dans lesquelles peut se transformer la chaleur interne du globe. Ce qui les caractérise et suffit à les définir, c'est le double fait de l'association intime dans les jets qu'ils fournissent de l'eau liquide à la vapeur d'eau, et de l'intermittence essentielle de leur allure.

Les sources chaudes sont à leur tour comme des diminutifs des geysers au point de vue de l'intensité des causes dont elles dérivent ; mais elles apportent un témoignage rendu très éloquent par leur nombre et il importe d'y faire une attention toute spéciale.

Ces eaux diffèrent extrêmement les unes des autres par la température qui pour quelques-unes est voisine du point

de l'ébullition tandis que pour d'autres elle ne se signale pas à première vue et ne peut être constatée qu'à l'aide de mesures précises. Cette dernière circonstance amène à chercher une définition exacte de la source thermale opposée à la source ordinaire et on la trouve dans la constance de la température absolument indépendante des variations saisonnières de la surface. Ce caractère suffit en effet pour différencier un échauffement venant d'une source constante comme elle, le foyer interne, d'un échauffement qui dérive du soleil dont l'ardeur varie en chaque point d'après les saisons et même d'après les heures de la journée. Mais il faut reconnaître cependant que les déplacements de laves peuvent faire varier beaucoup la température des sources des sols volcaniques.

Il ne sort d'ailleurs pas du sol, en fait de matériaux volatils, exclusivement que de l'eau ; on doit citer aussi des émanations dont la composition peut être différente et dont la température est également élevée.

Tout d'abord les volcans laissent dégager des gaz très chauds qui constituent les *fumerolles* et dont l'analyse a été faite à un très grand nombre de reprises : dans le nombre figurent l'hydrogène sulfuré, l'acide sulfureux, l'acide chlorhydrique et l'hydrogène.

L'acide carbonique qui sort aux environs de Naples, dans la célèbre grotte du Chien, est à une température qui ne diffère guère de la température extérieure ; mais il peut en être autrement ; ainsi à l'île Saint-Paul, d'après M. Vélain, il s'exhale du sol, avec des eaux, des quantités considérables d'acide carbonique souvent mélangé d'azote et dont la température varie suivant les points de 35 à 96 degrés.

Sans pousser plus loin l'énumération de ces faits bien connus, constatons qu'ils établissent nettement le pouvoir centrifuge du foyer intérieur. Celui-ci se comporte comme s'il déterminait tous les phénomènes de la physiologie planétaire.

Il est très intéressant de constater que les produits qui sortent du sol après s'être imprégnés de la chaleur interne jouissent d'une activité chimique qui peut se traduire par des modifications plus ou moins considérables des masses à leur contact.

C'est ainsi que l'écoulement des laves volcaniques s'accompagne d'un échauffement du sol sous-jacent et peut y déterminer des productions chimiques bien caractérisées. Par exemple une foule d'objets retrouvés à Pompeï montrent, dans leur composition modifiée, des effets de cette énergie chimique : on peut en voir au Muséum une série qui est fort instructive.

De même, les roches soumises à l'action des fumerolles volcaniques en sont dans bien des cas modifiées, soit par décomposition, soit par addition d'éléments nouveaux. Des quantités de produits s'y sont concrétionnés, comme le fer oligiste du Vésuve, du Stromboli et de bien d'autres volcans ; et l'on sait que c'est la rencontre de ce minerai qui a suggéré à Gay Lussac l'idée première des synthèses dont il a enrichi la géologie.

Les scories des volcans se signalent souvent par les bariolures éclatantes qu'y déterminent les enduits métalliques dont les fumerolles les ont recouvertes : chlorures de fer, chlorures de cuivre et autres ; sulfate de soude, sels ammoniacaux, etc. Dans les régions solfatariennes, le soufre se constitue en conséquence de phénomènes qui se rapprochent des précédents.

En s'épanchant au dehors des cratères, les laves déterminent parfois dans les roches sur lesquelles elle s'étalent des effets qui nous révéleront plus tard des séries de phénomènes géologiques : les argiles sont cuites et porcelanisées ; les grès sont prismatisés et vitrifiés ; les calcaires sont rendus plus compacts ou plus cristallins.

Des jets de vapeur chaude attaquent plus d'une roche ; les granits se kaolinisent et les trachytes passent parfois à l'alunite sulfurifère.

De même les eaux chaudes émises des laboratoires profonds modifient les masses superficielles. Les faits classiques observés dans les ciments et dans les blocages romains de Plombières et de Bourbonne sont à rappeler ici.

Enfin ces mêmes eaux chaudes, mises en possession, grâce à cette chaleur, d'une faculté de dissolution que le refroidissement leur retire, déposent autour de leur point d'émergence des incrustations variées qui jettent la lumière la plus vive sur l'histoire des dépôts métallifères. Les geysers constituent ainsi des zones de tufs silicieux ; maintes sources chaudes comme à Hammam Meskoutine et à Tivoli construisent des montagnes de calcaire parfois oolithique, d'autres comme à Lamalou, à Cauterets, à Plombières, à Kapouran, déposent des gangues et des minerais caractéristiques.

La chaleur émise des profondeurs et qui manifeste au maximum l'allure éruptive, agit en outre d'une façon uniformément concentrique au travers des massifs qu'elle imprègne ; et c'est aussi par le moyen de l'énergie qu'elle communique aux fluides, qu'elle détermine la légion des effets réunis sous la rubrique de métamorphisme général.

L'existence de la chaleur propre de la Terre une fois constatée, une tâche nécessaire s'imposait évidemment : en évaluer l'intensité. C'était seulement ensuite qu'on pourrait essayer de lui trouver sa signification véritable dans l'histoire générale du globe.

Les premières observations thermométriques réalisées dans des lieux profonds, remontent à 1791 et ont été exécutées en Saxe par Humboldt et par Freisleben. Elles furent reprises dans le même pays en 1802 par Daubuisson qui fit aussi des mesures en Bretagne dans les mines de Poullaouen et de Huelgoat. En 1819, Fox apporta à la question la contribution des faits fournis par la Cornouailles et en 1820 Humboldt publia des chiffres relatifs à la Colombie et au Pérou et que leur provenance éloignée rendaient spécialement intéressants.

Depuis lors, à la suite d'Arago, de Dulong, de Bous-singault, des frères Rogers, d'Erman, de Walferdin, des données se sont accumulées en nombre prodigieux et chaque jour on en recueille de nouvelles.

Mais on n'eut pas immédiatement les résultats précis espérés tout d'abord. Ce fut seulement en 1823 que Cordier leva les doutes sur la réalité de l'accroissement thermométrique avec la profondeur.

Les causes d'erreur sont, en effet, dans un pareil sujet d'étude aussi nombreuses que variées. Les puits et les galeries de mines dans lesquels on est contraint d'opérer sont soumis à de multiples causes d'échauffement ou de refroidissement qui masquent plus ou moins le fait à observer. La présence des ouvriers et des animaux qu'ils emploient, la combustion des lampes et, plus que toute autre chose, la lente oxydation des roches souterraines mises en contact avec l'air atmosphérique, sont des causes d'échauffement qui peuvent être considérables ; à l'inverse, l'arrivée de l'air extérieur poussé par les machines de ventilation et plus encore les suintements d'eaux superficielles appelées dans les excavations comme dans des tuyaux de drainage, sont des raisons de refroidissement.

On pourrait croire la cause perdue si les moyennes ne venaient ici affirmer leur toute-puissance en convergeant vers une limite qui se précise à mesure que le nombre des observations combinées entre elles est plus grand.

La solution c'est que la température propre de la Terre s'accroît de 1 degré pour chaque approfondissement de trente mètres, ou environ. Et une confirmation précieuse a été fournie par les mesures prises dans les puits artésiens, où les causes perturbatrices qui viennent d'être rappelés ne sauraient intervenir.

Il va sans dire que dans chaque cas des circonstances locales peuvent modifier la loi, mais c'est dans des limites peu étendues et, par exemple, tandis que l'accroissement

procuré par le puits de Grenelle est de 1° pour $32^m,20$, celui du puits de Mondorf dans le Duché du Luxembourg est de $31^m,04$ et celui de Saint-André (Eure) de $30^m,95$.

Il importe d'éliminer des calculs les puits qui sont placés dans des régions dont la condition thermométrique a été troublée par quelque phénomène particulier. Ainsi au voisinage des pointements volcaniques ou des sources chaudes, l'accroissement est beaucoup plus rapide. A Neuffen, en Wurtemberg, à proximité de masses énormes de basalte on trouve 1° pour $10^m,50$ seulement. Et à Comstock dans l'État de Nevada, l'échauffement se fait encore bien plus vite. A l'inverse il est des points où il est plus lent et par exemple à New Salzwerk, on a 1° pour $41^m,80$.

Si l'on admet la légitimité des conclusions tirées des mesures précédemment résumées, il est tout naturel de rechercher ce que produirait l'accroissement reconnu de température avec la profondeur pour des distances à la surface qui n'ont pas été effectivement atteintes.

Ce taux d'accroissement étant pour le premier mètre au-dessous de la zone superficielle à température variable, de un trentième de degré ou $0^{\circ},03$ et par conséquent pour le premier kilomètre, d'ailleurs atteint et dépassé dans plus d'un forage, de 30° on peut par extrapolation le fixer, pour 2 kilomètres à 60 degrés, pour 20 kilomètres à 600 degrés, pour 40 à 1200° , par 60 kilomètres à 1800° , etc. Certains auteurs, comme Poisson et comme Humboldt¹, ont poussé cette progression jusqu'au centre auquel ils ont ainsi assigné une température de 200 000 degrés ; et même quelques autres, comme Vézian, se sont demandé s'il ne conviendrait pas de calculer l'accroissement, non plus selon une progression arithmétique, mais selon une progression géométrique.

1. *Cosmos*, t. I, p. 194.

Mais on a fait à cet égard une remarque d'autant plus importante qu'elle paraît fournir la clé de toute une grande série de phénomènes en faisant intervenir la considération d'une croûte solide reposant sur un noyau fluide intratellurique. Cette remarque c'est qu'à la température correspondant à une distance de 60 kilomètres de la surface du sol la température indiquée par le taux de progression est suffisante pour liquéfier toutes les matières minérales que nous connaissons. Il en résulte qu'à cette profondeur, qui égale seulement le centième du rayon planétaire, rien de solide ne peut persister et que la Terre, considérée dans son ensemble, nous apparaît comme une masse fluide enveloppée d'une très mince pellicule solide.

Bien des objections ont été faites à la conception de la croûte et par exemple on a dit que la densité du noyau s'opposerait nécessairement à sa fluidité, ce qui revient à dire qu'un corps ne saurait persister à être fluide s'il était réuni en quantité suffisante. Peu de personnes se sont placées à ce point de vue.

On a fait observer que si la masse interne du globe est fluide elle doit éprouver, à l'égal des mers, des marées qui devraient déterminer des tremblements de terre périodiques. A cela on peut répondre, avec M. Raillard, que ces marées sont surtout théoriques et qu'en réalité elles sont trop faibles pour produire une déformation sensible.

Hopkins a insisté sur une autre objection. D'après lui si l'intérieur du globe était fluide, il ne suivrait pas l'écorce dans son mouvement de rotation diurne et les effets produits par l'attraction du Soleil et de la Lune seraient tout autre que ceux qui sont observés. Mais des expériences instituées sous l'inspiration de Delaunay ont montré qu'au contraire un liquide contenu dans un ballon qui tourne suit parfaitement le ballon dans son mouvement de rotation.

Bien d'autres difficultés ont été opposées mais aucune ne peut être considérée comme décisive.

Au contraire, diverses observations sont considérées comme ayant un caractère de confirmation de la théorie. En tête on peut rappeler ce que procure l'observation contemporaine des phénomènes solaires.

Remarquons en passant que les premières suppositions relatives à l'écorce terrestre sont fort anciennes : déjà Platon, dans le *Phédon*, émet l'avis que le globe doit être creux ; il y pousse même des plantes et il y vit des animaux éclairés d'ailleurs par deux astres auxquels il donne les noms de Pluton et de Proserpine. Auprès du pôle est une ouverture qui permet l'entrée et d'où s'écoule la lumière des aurores boréales¹.

Désireux d'accorder son hypothèse de la compressibilité indéfinie de la matière avec l'aplatissement du globe, le physicien Leslie fut conduit à considérer l'intérieur de la Terre comme une caverne sphérique « remplie d'un fluide impondérable, mais doué d'une force d'expansion énorme ».

En laissant de côté ces rêveries et beaucoup d'autres qu'on pourrait mentionner à leur suite, il est intéressant de rappeler en deux mots quelques-unes des hypothèses émises quant au procédé de production de la croûte, rattachée à l'incandescence primitive de notre planète.

Leibnitz, dans sa *Protogée*, admet que, dans les premiers temps de la formation du globe, les eaux ont été projetées dans l'atmosphère sous forme de vapeurs ; par suite du refroidissement, ces eaux se sont précipitées et, en lavant les scories, ont constitué une lessive ou saumure qui est l'origine de la mer. Quoiqu'il soit plus simple d'admettre que les éléments du sel étaient volatilisés d'abord avec l'eau, la mention de cette hypothèse est

1. *Cosmos* de Humboldt, I, 193 ; on sait comment le capitaine Symnus invita même solennellement Humboldt et Humphry Davy à organiser une expédition souterraine dans les régions décrites par Platon

utile à cause de son analogie avec celle qui fut émise par Humphry Davy à la suite de son immortelle découverte des métaux alcalins. Davy rattache la production de la croûte terrestre à la *coupellation universelle* d'un noyau dans la constitution duquel ses métaux existaient comme éléments fondamentaux.

Au lieu de l'atmosphère comburante admise par Davy, c'est une atmosphère d'hydrogène que faisait intervenir de Boucheporn, dans les premiers temps de la constitution terrestre, y admettant d'ailleurs plusieurs autres corps, tels que l'hydrogène carboné, l'azote et le cyanogène, cette atmosphère entourant un noyau métallique composé de cyanures et de leurs combinaisons avec les chlorures, les fluorures et les sulfures. A un moment donné, de l'oxygène, provenant d'ailleurs du Soleil, serait survenu tout à coup et aurait engendré instantanément les eaux de la mer dont les vapeurs en se condensant ont réagi sur le substratum solide. Tous les éléments de la croûte proviendraient de cette origine commune,

Il y a d'ailleurs, comme complément, à rechercher quelle a dû être la roche le plus anciennement constituée par la première consolidation de la croûte et ce ne sera pas un hors-d'œuvre dans ce très court aperçu que d'y arrêter un moment notre attention.

L'opinion générale est que cette roche est le granit et elle est fondée avant tout sur le fait de la présence universelle du granit comme soubassement de tous les terrains stratifiés. On peut admettre que si on épluchait la Terre de tous les sédiments qui la recouvrent, on mettrait à nu une surface continue de granit. C'est par exemple l'opinion de de Saussure, pour qui le granit est la roche primitive par excellence.

On s'est même ingénié à retrouver le processus en vertu duquel le granit doit avoir pris naissance et il est dans notre sujet de noter quelques-unes des opinions émises. Les plus nombreuses rattachent le granit à une origine

purement ignée, et à cet égard cette roche ne constitue qu'un cas particulier dans une manière d'être universelle. Dans sa *Prologée*, Leibnitz défend cette thèse que la plupart des roches sont des produits de fusion. « Si les grands ossements de la terre, dit-il, ces roches nues, ces impérissables silex, sont presque entièrement vitrifiés, cela ne prouve-t-il pas qu'ils proviennent de la fusion des corps, opérée sous la puissante action de la nature sur la matière encore tendre ?... Le verre est en quelque sorte la base de la terre ; il est caché sous le masque de la plupart des autres substances. » Sans aller si loin, et cela va sans dire, on a cependant vu beaucoup d'auteurs rattacher l'origine du granit à des phénomènes de dévitrification, suivre en quelque sorte la voie tracée par Leibnitz et adoptée par Buffon. C'est ainsi que Durocher attribue la roche fondamentale à la solidification d'un magma fondu ayant la composition du pétrosilex. Il ajoute que la viscosité de la silice lui a permis de mouler les grains de feldspath, à la suite d'un départ qui isole successivement les différents minéraux. Breislak avait émis des vues analogues et Élie de Beaumont a beaucoup insisté, à la suite des célèbres expériences de Marc-Antoine Gaudin, sur la propriété de la silice fondue de rester visqueuse tandis que l'alumine se comporte tout autrement, propriété qui lui paraît rendre compte de l'état du quartz dans les granits. De son côté, Fournet, en 1844, voulait expliquer les empreintes du feldspath dans le quartz par la surfusion de la silice qui resterait liquide bien au-dessous de son point de fusion ¹.

Et ce n'est que sur un plan très effacé qu'il y a lieu de rappeler les tentatives d'explication de l'origine du granit par la voie humide. C'est pourtant ce que s'attachèrent à faire les Neptunistes, et même après que le dernier Wernérien avait disparu, par Boucheporn, qui opposait à l'universalité du granit la salure universelle des mers, en in-

¹ *Comptes rendus*, t. XVIII, p. 1056.

sistant sur le caractère complémentaire des deux phénomènes : d'un côté la potasse et de l'autre la soude se sont concentrées, à la même époque, dans les deux régions différentes. Le célèbre théoricien pense que tous les éléments du granit résultent d'un même dépôt qui s'est fait dans les mers primitives. Une chaleur « adventice » venant ensuite à s'exercer sur le précipité y a déterminé la production des composés fusibles, tels que le feldspath et le mica, et l'élément réfractaire, c'est-à-dire le quartz « isolé à l'état naissant », fluide sans fusion complète, mais à un certain état de mollesse.

On sait que des travaux ultérieurs, appuyés sur la base décisive de l'expérimentation, ont démontré que le granit résulte de la voie mixte et ont procuré la synthèse de toutes ses parties essentielles par une application judicieuse de la méthode de Senarmont.

Toutefois la question est restée entière de savoir si le granit constitue la matière de la coque solide primitive du globe et j'ai eu l'occasion de développer à cet égard un point de vue tout différent¹. Sans y insister ici, je me bornerai à rappeler que l'observation du Soleil nous met en présence d'un astre où le phénomène de la condensation initiale est en voie d'accomplissement : où, si l'on veut, se déclare pour la première fois l'état solide en conséquence du refroidissement spontané d'une masse jusque-là fluide. Il doit donc être hautement profitable d'examiner, pour les préciser, les conditions d'un pareil milieu. La conclusion c'est que la matière photosphérique est un produit de condensation brusque de vapeurs comparable à un *givre*, malgré le prodigieux écart des températures. Des essais de reproduction synthétique du phénomène photosphérique nous ont procuré des résultats qui ont fixé l'attention² et qui montrent comment des minéraux

¹ *La géologie expérimentale*, p. 241 et suiv.

² *Savants étrangers*, t. XXVII, n° 5, (août 1880)

très variés peuvent résulter de réactions développées exclusivement entre des éléments gazeux. Le pyroxène, le peridot, les feldspaths, le fer métallique, des alliages divers de fer et de nickel, d'autres produits encore, se sont ainsi constitués et il n'y a qu'à les supposer mutuellement associés d'une façon convenable pour reconstituer par la pensée des roches évidemment inférieures au granit dans l'écorce du globe et que rien n'empêche de considérer comme étant de la catégorie des masses de première consolidation : ce sont les dunites et les roches analogues, pyroxénites, peridotites et dolérites à fer natif, qui sont doués de la même composition que plusieurs types de météorites et, selon l'expression de M. A. Cornu, de celle même de la photosphère du Soleil¹.

Le granit, en cette manière de voir, n'est donc qu'une formation secondaire, conformément d'ailleurs aux vues de Delesse qui y voyait, à la surprise de ses contemporains, un produit métamorphique.

Quelle est l'origine de la chaleur propre de la Terre ? Bien des hypothèses ont été faites et on les énumérerait toutes à grand'peine et sans profit.

Descartes écrit dans *Les principes de la philosophie*, qui sont de 1668 : « Feignons que cette Terre où nous sommes a été autrefois un astre... en sorte qu'elle ne différât en rien du Soleil, mais qu'elle était plus petite : mais que les moins subtiles parties de sa matière, s'attachant peu à peu les unes aux autres, se sont assemblées sur sa superficie et y ont composé des nuages ou autres corps plus épais et obscurs, semblables aux taches qu'on voit continuellement être produites et peu après dispersées sur la superficie du Soleil. »

Whiston (1677 à 1752) admet que la chaleur interne dérive de la nature cométaire antérieure que l'auteur attribue à notre globe. Pour Fourier la chaleur propre

1. *Comptes rendus*, t. LXXVI, p. 101, 315 et 530.

est une chaleur d'origine : son point de vue a d'ailleurs été spécialement fécond pour la théorie de la Terre.

Laplace se signale parmi les théoriciens par la grandeur et la simplicité de sa conception : elle consiste à croire que la chaleur interne est le résultat de la transformation du mouvement d'attraction éprouvée par toutes les molécules de la nébuleuse primitive vers leur centre commun de gravité.

Dans une tout autre direction, Croll en 1877 voit l'énergie, dont le système du monde est le résultat, dériver de masses cosmiques froides.

Poisson trouvant qu'à $\frac{1}{100}$ du rayon terrestre la température souterraine est de 2000 degrés et (supposant toute la masse solide) en concluant que le centre est à 200000 degrés, part de cette conclusion qu'il déclare impossible, pour émettre l'avis que la Terre a dû perdre toute sa chaleur d'origine qui résultait de sa compression sur elle-même. Après ce refroidissement le globe a été porté, par son mouvement dans le ciel, dans une zone de l'espace tellement chaude que sa masse a été entièrement fondue. Le passage dans cette zone a pu durer des milliers d'années. Depuis lors, la température du ciel a diminué très vite « comme le montrent les phénomènes géologiques » jusqu'à un état à partir duquel le refroidissement s'est continué très lentement.

Ces quelques mots suffisent pour montrer le vague qui persiste encore dans l'esprit des théoriciens quant à la cause d'où dérive la chaleur souterraine.

2 — LA PESANTEUR COMME CAUSE DE PHÉNOMÈNES GÉOLOGIQUES

On peut dire sans exagération que la cause la plus fréquemment mise en œuvre des phénomènes géologiques c'est la pesanteur, c'est-à-dire l'attraction que le centre du

globe fait éprouver à chaque instant à toutes ses particules constituantes.

D'abord, c'est cette pesanteur qui assure à l'édifice stratigraphique toute sa stabilité et c'est elle qui détermine toutes les circulations centripètes de matière, dont nous avons des exemples de tous côtés. C'est elle qui maintient dans leurs limites les flots de la mer et qui épure, des substances mélangées, les eaux relativement tranquilles, et la masse elle-même de l'atmosphère.

On peut commencer la revue rapide des actions géologiques imputables à l'exercice de la pesanteur par le phénomène si vulgaire de la chute de la pluie. C'est en effet la première étape d'une série de déplacements de l'eau dont chacun s'accompagne de résultats directs dans la situation ou dans la composition des éléments minéraux du globe.

La pluie qui tombe, par son seul choc, détermine la désagrégation de bien des masses rocheuses et son ruissellement sur le sol incliné entraîne les débris jusque dans les parties basses.

Dans les montagnes, où des parois rocheuses se dressent au-dessus des pays environnants, l'eau superficielle déchausse des blocs qui s'écroulent et recouvrent les masses en place de cônes énormes d'éboulis. Une promenade dans maintes gorges de nos Alpes ou de nos Pyrénées suffit pour nous édifier pleinement sur l'efficacité de la pesanteur pour appeler dans les bas-fonds les éléments des aiguilles et des sommets : et les chaînes montagneuses nous apparaissent comme d'immenses édifices en ruine rapide, qu'il faut s'empresse de contempler avant qu'elles ne disparaissent.

La pesanteur s'empare de tout élément situé à un niveau relativement haut et l'entraîne de proche en proche jusque dans les abîmes de la mer. Il peut y avoir beaucoup de stations dans ce voyage et des stations fort longues humainement parlant, mais le but n'est pas

pour cela compromis et c'est à coup sûr que chaque fragment arrive à destination.

L'intempérisme, qui s'attaque sans relâche à lui, qui l'arrondit, l'émousse et l'égruge, a toujours dans la pesanteur son auxiliaire le plus décisif et non seulement dans les actions purement mécaniques, mais même aussi dans les altérations chimiques où elle fait pénétrer le réactif dans les masses attaquées et d'où elle arrache les produits transformés, pour remettre toujours des surfaces neuves à la portée des agents à l'œuvre.

C'est encore la pesanteur qui donne aux eaux des rivières la force d'éroder leurs rives, et de transporter les débris de plus en plus vers la mer ; — et c'est elle aussi qui détermine la précipitation des limons, des sables et des graviers dans les points relativement tranquilles où s'édifie toute la sédimentation fluviale, si éminemment provisoire et qui n'est qu'une étape dans la marche des matériaux en route pour le fond sous-marin.

La descente des glaciers le long des flancs montagneux est déterminée pour une grande part par la pesanteur et il en résulte l'un des mécanismes les plus énergiques de démolition des montagnes. Nous aurons plus loin à y insister, mais on peut dire tout de suite que le glacier, à cause de son poids, se comporte vis-à-vis du sol qui le supporte comme une lame de scie sans fin agissant sur une matière sectile. Il le débite en segments que les autres agents de dénudation attaqueront d'autant plus vite.

Sous l'influence de la pesanteur l'eau s'infiltré dans les roches poreuse ou fissurées, elle alimente une circulation incessante et dans son trajet elle modifie bien des roches mouillées, déterminant comme contrecoup des éboulements et des effondrements, des glissements dont le Rossberg et le Piton de Salazie présentent des exemples frappants.

En circulant dans les nappes perméables, l'eau souterraine rencontre fréquemment des points d'affleurement à

la surface du sol et elle se compose alors avec l'eau extérieure, de façon très intime et très variée.

Par tous ces procédés, l'eau tend à se concentrer dans le bassin des mers et dans celui des grands lacs, et ici encore la pesanteur, qui l'a collectée, interviendrait d'après M. Faye pour déterminer des phénomènes spéciaux. Cet illustre savant a émis l'avis que la croûte terrestre s'étant constituée et les actions consécutives au refroidissement l'ayant accidentée, la mer s'est réunie dans son bassin. Il en serait résulté pour les points correspondants une cause qui aurait accentué l'affaissement du bassin marin, en rendant plus rapide le refroidissement des masses sous-jacentes et déterminé leur épaissement. Cette vue toutefois soulève des objections et on peut se demander si la plongée verticale de portions de croûte surchargée n'amènerait pas, par réchauffement, la fusion et par conséquent la destruction de sa portion la plus profonde. De sorte qu'il y aurait autant de raisons contre l'hypothèse qu'en sa faveur.

Sur nos côtes, la pesanteur a une part également colossale dans les opérations de la dénudation ; c'est le vent, c'est la marée (c'est-à-dire le Soleil et la Lune) qu'il faut regarder comme les moteurs des flots attaquant la falaise ; mais la pesanteur intervient à chaque instant et par exemple en provoquant des glissements et des éboulements parfois très considérables.

Dans le bassin des océans c'est la pesanteur qui détermine la chute des troubles et des débris charriés et elle se compose si exactement avec les impulsions diverses de l'eau qu'elle réalise en chaque point un triage exact des matériaux en présence. On doit voir dans cette circonstance la raison d'être d'un des caractères les plus saillants des terrains stratifiés, c'est-à-dire leur simplicité relative de composition minéralogique.

Parmi les phénomènes qui dérivent du foyer attractif résidant dans les profondeurs du sol, il y a lieu de men-

tionner spécialement, autour des bouches volcaniques, l'accumulation des pierrailles et des autres matériaux solides projetés de l'intérieur. Il se fait là une sédimentation subaérienne toute particulière dont les caractères méritent d'être précisés, surtout en considération des comparaisons qu'on en pourra faire avec les traits correspondants de sédimentations ayant une autre origine.

Parfois des écorchures permettent de voir la structure des cônes encore brûlants : mais il est plus commode de s'adresser à ceux qui semblent éteints et qui cependant sont géologiquement si récents qu'il n'y a pas de doute sur leur identité originelle avec les précédents.

Par exemple, le beau cône du volcan de Gravenoire à la porte de Clermont-Ferrand permet de reconnaître dans tous ses détails la disposition « en chevrons » de tous les lits de lapilli, constitutifs de la montagne.

La cause de cette disposition laisse d'autant moins de doute qu'il est facile de la reproduire par une expérience très simple. Une soufflerie verticale lançant son jet d'air au travers d'une accumulation de petits fragments ponces amène rapidement la production d'un petit cratère auquel on donne des détails variés de structure en modifiant de temps en temps la vitesse du gaz et la grosseur des matériaux remaniés.

C'est un phénomène à rattacher aussi à l'influence de la pesanteur que l'écoulement des laves sur les flancs des montagnes volcaniques et l'étude de cet écoulement peut avoir des conséquences importantes en nous révélant, pour les diverses époques où elles ont eu lieu, la forme du sol d'une même région ; nous aurons à appliquer largement cet ordre de considérations.

La sédimentation amenant la superposition des masses pesantes, celles qui occupent les régions relativement inférieures subissent, du fait de la pesanteur, une compression progressivement croissante et c'est la cause de bien des phénomènes importants. Souvent les roches, même les

plus résistantes, acquièrent dans ces conditions une sorte de fausse fluidité qui permet leur écoulement, comparable à celui que Tresca a naguère étudié dans une série de corps solides. Beaucoup de particularités dans la structure des roches, telles que le feuilleté et le cataclastysme si fréquent par exemple dans les calcaires anciens, sont à rattacher à ce mécanisme.

Enfin, pour borner à des points tout à fait saillants cette revue rapide du sujet, notons que c'est la pesanteur qui paraît jouer le rôle de cause déterminante dans bien des cas de tremblement de terre et dans les éruptions volcaniques. C'est en effet à la chute de matériaux imprégnés d'eau dans les cavités souterraines qu'il convient d'attribuer, par des explosions subites, la production des chocs sismiques et par l'occlusion de vapeurs dégagées qui se dissolvent dans les roches fondues des laboratoires internes, les propriétés foisonnantes où les laves trouvent leur faculté ascensionnelle dans les cheminées volcaniques.

3 — L'ACTIVITÉ SOLAIRE COMME CAUSE DE PHÉNOMÈNES GÉOLOGIQUES

Le Soleil constitue le centre et le point de départ d'une activité géologique toute spéciale. Pour en avoir une idée il convient tout d'abord de faire comme un triage entre les influences diverses que notre astre central a sur notre globe et qui, tout en ayant toujours des contrecoups géologiques, concernent suivant les cas des matériaux exclusivement minéraux, ou des substances animées, grâce à lui, de caractères biologiques.

Les rapports de la Terre avec le Soleil sont évidemment très intimes et pour ce qui est des temps présents la belle expression d'Helmholtz que « nous sommes les enfants du Soleil », est pleinement justifiée. Mais il importerait de préciser ce qu'ont été ces rapports dans le passé et,

avant toute chose, quelles ont été les relations d'origine des diverses parties du système solaire.

La théorie de Laplace fournit à cet égard une solution généralement acceptée et qui satisfait l'esprit par son ampleur et sa simplicité. Ce qu'il nous en faut retenir ici c'est que l'individualisation de la Terre, résultant de la force centrifuge engendrée par la rotation dans la zone équatoriale de la nébuleuse primitive, on doit regarder l'activité centrale, antérieure à la concentration du soleil, comme ayant déterminé l'état physique du lambeau de matière nébuleuse destiné à devenir notre planète.

Il résulte de là qu'à l'époque où la concentration progressive de ce lambeau s'est opérée autour de son centre de gravité, la chaleur mise en mouvement par cette auto-compression n'a été que la réapparition de l'énergie initiale employée d'abord à écarter les molécules les unes des autres. En d'autres termes, la chaleur propre de la Terre n'est qu'une manifestation de la chaleur dont était imprégnée dès l'abord la matière générale dont tout le système solaire est bâti.

La remarque méritait d'autant plus d'être faite que nous avons été conduit à distinguer nettement le Soleil du centre d'activité infragranitique et que nous assisterons plus d'une fois aux conflits de ces deux foyers de chaleur.

C'est plus loin que nous aurons à rechercher comment a pu varier, d'époque en époque, l'efficacité géologique du Soleil et comment ont pu changer les produits qu'il faut lui rattacher. Pour le moment et comme termes de comparaisons utiles à mettre en réserve, il importe de faire en quelques lignes le tableau des principales actions dont le soleil nous procure les résultats.

Le premier fait à considérer dans cette série c'est l'inégalité des températures développées par le Soleil sur les divers points de la surface terrestre. C'est en effet, non seulement l'origine de différences profondes entre des localités où s'accompliront, en conséquence des phénomènes

très différents, mais encore celle de la circulation des fluides, liquides ou gazeux. Tout le monde sait que la température élevée des régions équatoriales, opposée à la basse température des pôles, détermine un échauffement et par conséquent une raréfaction relative de l'air qui est la source de toute la circulation atmosphérique. Ce qu'il nous faut en retenir ici c'est que les courants aériens, étant capables de charrier des poussières minérales qu'ils abandonnent plus ou moins loin, on devra s'attendre à rencontrer, dans la distribution des sédiments éoliens, un contre-coup de cette disposition générale.

C'est en effet ce qui a lieu et, quand les caractères pétrographiques des localités s'y prêtent, on voit les vents réguliers se doubler pour ainsi dire de courants réguliers de poussières et de sable travaillant sans relâche à un alluvionnement particulier. C'est ainsi qu'aux environs du Cap Vert les alizés étant approvisionnés par la grande surface arénacée du Sahara, la mer est saupoudrée régulièrement de sable tombé de l'atmosphère.

De la même façon, l'Égypte est à certaines époques de l'année gratifiée de pluies abondantes de sables siliceux et calcaires qui alternent de la façon la plus régulière avec les dépôts du limon argileux qu'étale à chaque crue le fleuve débordé. Et ce n'a été qu'une observation incomplète qui a fait qualifier le Nil de père nourricier de l'Égypte, une partie de la fertilité légendaire du pays provenant de l'élément arénacé du sol dont le dispensateur est le vent.

En déterminant les grands traits de la circulation des vents, les inégalités climatériques produisent aussi l'établissement des grands courants dynamiques de la mer et c'est la raison d'une coïncidence générale des trajectoires atmosphériques et océaniques. Le gulf-stream par exemple est accompagné d'un courant d'air, auquel même certains observateurs, à l'exemple de Georges Pouchet, attribuent plutôt qu'au courant d'eau la température relativement si douce de nos côtes occidentales.

Ce que nous disions pour les courants d'air s'applique aux courants aqueux en ce qui concerne le transport et le dépôt de matériaux géologiques. Aussi une grande part de la sédimentation océanique a-t-elle sa raison d'être et son explication dans l'influence directe du Soleil sur l'état dynamique de la mer.

Un exemple suffira pour consacrer cette conclusion et nous pouvons l'emprunter à l'histoire du banc de Terre-Neuve, qui n'est pas autre chose, par la masse de fragments rocheux qui le constituent, qu'un vrai stéréogramme de la circulation des flots d'eau charriant les glaces flottantes.

L'ensemble des deux océans liquide et gazeux nous apparaît, en conséquence des effets qu'il éprouve du Soleil, comme un gigantesque appareil distillatoire où des vapeurs engendrées dans la « chaudière » équatoriale viennent sans cesse se condenser et se cristalliser dans le « serpentinite » polaire. La recharge ininterrompue de la chaudière par les courants de retour aqueux et aériens donne à cet ensemble une apparence continue éminemment physiologique.

La distillation dont nous venons de parler en chargeant l'atmosphère des vapeurs qui s'y rassemblent pour engendrer les nuages de pluie, de neige ou de grêle va entrer comme cause déterminante de ces phénomènes mentionnés plus haut et dont le moteur est l'attraction infragravitique ou la pesanteur terrestre. Elle nous montre dans le Soleil le générateur d'une énergie centrifuge qui assure la persistance de la circulation verticale des fluides non seulement à travers l'atmosphère, mais aussi dans l'épaisseur des océans et surtout dans une partie de la croûte terrestre.

Cette circulation verticale présente elle-même, comme une annexe, les méandres de la circulation des eaux à la superficie des continents : les précipitations pluviales bientôt réunies en ruisselets, en rivières et en fleuves alimentent, comme les lacs et la mer, une évaporation active où les nuages retrouvent tout de suite la matière aqueuse qu'ils ont perdue.

Et dans cette circulation, les glaciers de montagnes méritent une mention comme les calottes glacées des pôles.

Il est d'ailleurs une autre manière d'agir du Soleil sur les circulations terrestres et qui n'est pas moins efficace : c'est l'attraction qu'il exerce sur les parties fluides de l'organisme tellurique, les « marées » qu'il y détermine.

Pour ce qui est de la mer, il n'est pas douteux que la marée n'intervienne fréquemment comme le facteur décisif de certaines actions géologiques. Bien des points du littoral ne sont attaqués par les flots qu'aux grandes marées d'équinoxe et d'autres le sont périodiquement à toutes les marées ordinaires, grâce d'ailleurs à l'affaissement continu du sol dans la région considérée.

Les marées, à la production desquelles la Lune contribue dans une si large mesure, doivent avoir dans la masse atmosphérique des conséquences qui se traduisent par des variations dans les courants d'air et par suite dans les actions géologiques qu'ils peuvent réaliser.

Du reste, certains théoriciens sont allés beaucoup plus loin et ont émis l'avis que l'attraction sélénosolaire doit déterminer les marées des fluides contenus peut-être dans la coque solide du globe. S'il en était ainsi, les tremblements de terre consécutifs aux frottements et aux chocs de cet océan infragranitique contre la paroi qui l'emprisonne, tireraient leur cause prochaine d'actions astronomiques et quand on songe aux conséquences certaines des séismes quant à la morphologie de la planète, on se dit que bien des détails de la surface seraient alors rattachables à cette même origine céleste.

Mais il est une autre voie encore dans laquelle le rôle géologique du Soleil se signale d'une manière exceptionnellement éloquente : c'est celle qui conduit à l'apparition et aux modifications successives des êtres vivants, animaux et végétaux. Ici, nous n'avons pas de supposition initiale à formuler et nous savons de science certaine que l'organisme vivant est un appareil de transformation des radiations

solaires. La plante commence le labeur et fait disparaître une somme gigantesque d'énergie héliaque en disposant dans un état d'équilibre fragile les éléments empruntés à l'acide carbonique et à l'eau qui constituent la cellulose. Elle se révèle à nous comme étant, dans toute la vérité du terme, un accumulateur de l'énergie solaire toute prête à réapparaître sous les formes variées de la force, dès que la combustion du tissu végétal remet le carbone et l'hydrogène du composant dans une situation plus stable. Et la première fois que l'esprit s'arrête sur elle, c'est une conception impressionnante que celle de la haute antiquité des effluves que nous procure un feu de houille et de son origine dans le Soleil qui brillait au jour où le combustible minéral s'épanouissait à l'air en vastes forêts verdoyantes. On se demande alors si plus tard on n'arrivera pas, en étudiant convenablement les radiations des charbons de tous les âges, à trouver entre elles des différences qui pourraient répercuter quelques modifications dans les rayons solaires reçus par la Terre aux époques diverses de leur constitution.

Depuis que la faune et la flore se sont constituées, le Soleil intervient pour en régler les manifestations : il préside sans doute au remplacement des formes usées par des formes régénérées et périodiquement, sous nos yeux, il provoque la marée biologique annuelle qui se traduit par l'explosion de la végétation et de la vie animale.

Il ne faut pas oublier que c'est sous l'influence directe du Soleil que bien des végétaux remplissent des fonctions immédiatement traduites par la constitution de véritables roches. Par exemple des eaux bicarbonatées parvenant au jour, des micro-organismes végétaux s'y développent et, sous l'action du soleil, dégagent de l'oxygène, versé à flot dans l'atmosphère, en précipitent du calcaire qui s'accumule en masses énormes de travertin. C'est un fait de rencontre constante dans maintes régions dont le sol est convenablement constitué et, pour ma part, je l'ai étudié

avec un intérêt à chaque instant renouvelé dans la partie calcaire des Alpes suisses¹.

C'est encore à la part prise par les êtres vivants dans l'architecture de notre globe qu'il faut rattacher par certains de ses côtés la constitution de la terre végétale.

L'épiderme cultivable de la Terre possède au maximum le don de la persistance dans le changement ; il est toujours là et à chaque instant ses particules constitutives sont remplacées par des éléments nouveaux. Son épaisseur comme sa composition restent à peu près les mêmes et cette circonstance fait singulièrement ressembler la terre végétale aux tissus des organismes. Comme eux, elle dérive aussi d'une façon directe de la puissance dynamique qui émane du Soleil.

1 *Comptes rendus*, t. CXXIX, p. 659 (1899).

CHAPITRE II

LES APPAREILS DE LA PHYSIOLOGIE TELLURIQUE

En cherchant à faire la part des centres d'activité qui viennent d'être énumérés dans les grands phénomènes géologiques, on arrive à définir sept appareils présidant à des fonctions nettement distinctes, bien qu'ils entrent fort ordinairement dans des collaborations plus ou moins complexes.

Nous allons les décrire successivement en sept paragraphes consacrés : à l'écorce flexible du globe, au volcan, à la nappe d'eau souterraine profonde, à la nappe d'eau souterraine superficielle, à la mer, au glacier, à l'atmosphère et à l'être vivant.

1 — L'ÉCORCE FLEXIBLE

La croûte terrestre, c'est-à-dire la portion du sphéroïde planétaire qui a éprouvé un refroidissement suffisamment intense pour prendre l'état solide, constitue dans l'anatomie de notre globe un organe affecté à des fonctions très diverses mais nettement définies. Nous aurons l'occasion d'insister sur des réactions de plus d'un genre qui prennent leur cours dans son épaisseur. Pour le moment il nous suffira d'arrêter notre attention sur une série de faits qui se rattachent à la mobilité de l'écorce qui se comporte véritablement comme une enveloppe douée d'une certaine flexibilité.

Pour bien comprendre le point de vue auquel nous allons nous placer, il est d'ailleurs nécessaire de noter que si la croûte a bien réellement l'origine que nous venons de rappeler, son épaisseur actuelle et par conséquent la flexibilité qui en résulte ont été précédées, et seront suivies d'autres épaisseurs et de flexibilités différentes. Après avoir pénétré dans le secret des phénomènes en voie d'accomplissement sous nos yeux nous serons préparés à constater l'intensité non identique qui leur serait relative pour d'autres temps.

Pour ce qui est du passé, on est conduit naturellement à se demander avec quelle allure a lieu le refroidissement spontané de la terre. Les observations n'étant pas suffisantes à cet égard, vu sans doute le peu de temps depuis lequel elles sont poursuivies, on les a complétées par des hypothèses dont quelques-unes sont à mentionner.

C'est ainsi que Mairan, Buffon, Bailly évaluaient pour la France la chaleur qui s'échappe de l'intérieur de la Terre à un grand nombre de fois celle qui nous vient du Soleil : 29 fois celle que nous recevons de celui-ci en été et 400 fois celle dont nous profitons en hiver.

Mais il y avait là une erreur évidente et Fourier a prétendu prouver par le calcul que la collaboration des régions internes à la température de la surface se bornerait à $1/30$ de degrés ! En outre Poisson, partant de ce chiffre comme acquis, ajoute qu'il faudrait 1 000 millions de siècles pour que cette contribution fût réduite de moitié. Et si l'on veut donner à ces considérations une forme un peu plus tangible, on peut ajouter que, d'après Fourier, la Terre plongée dans le ciel plus froid qu'elle ne se refroidit pas plus en 1 280 000 années que ne le ferait en 1 seconde un globe de même nature abandonné dans le même milieu et qui n'aurait qu'un pied ($0^m,33$) de diamètre.

Il est vrai que cette dernière assertion a été quelque peu contestée par Bischof qui, d'après ses expériences sur le refroidissement de boules de basalte, conclut qu'il ne

faudrait à la terre que 9 millions d'années pour passer de 22° à 8°, c'est-à-dire pour perdre 14 degrés.

A cet égard il y a lieu de remarquer que ce nombre doit (s'il est exactement calculé) être fortement modifié à cause d'une circonstance à laquelle on n'a sans doute pas attaché assez d'importance. C'est que le refroidissement de la masse interne permettant et provoquant même des combinaisons entre des éléments primitivement séparés, celles-ci doivent dégager beaucoup de chaleur. L'échauffement ainsi produit retardera le phénomène de refroidissement et sans doute dans une très large mesure. Déjà nous avons dit que c'est par son refroidissement progressif que le Soleil est devenu lumineux ; il faut remarquer aussi que son pouvoir émissif de la chaleur peut varier avec l'état physique de la photosphère.

Elie de Beaumont, pour faire comprendre l'amplitude du refroidissement terrestre, propose une comparaison frappante : Pouillet ayant exprimé la chaleur reçue par la Terre en une année en constatant qu'elle serait capable de fondre une couche de 31 mètres d'épaisseur de glace étendue sur la surface entière de la planète, on trouve que le flux de chaleur d'origine intraterrestre ne pourrait fondre dans le même temps qu'une couche de glace de 65 millimètres.

Le même auteur ¹ a étudié d'une manière intéressante le rapport qui existe entre le refroidissement progressif de la masse terrestre et celui de sa surface, et l'une des conclusions les plus notables de son travail c'est que les débuts du refroidissement terrestre pourraient dater de 38 359 ans, ce qui est certainement fort insuffisant.

C'est en partant de considérations essentiellement différentes qu'Arago ² est arrivé de son côté à toucher légèrement la question du refroidissement spontané du globe.

1. *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. XIX, p. 1327, 1844.

2. *Œuvres complètes*, t. VIII, p. 191.

Remarquant que la contraction du sphéroïde terrestre, consécutive à la diminution de sa chaleur propre, amènerait une modification dans la vitesse de sa rotation, il constate que depuis 2 000 ans la température de notre planète n'a pas pu varier d'un degré, vu la constance des mouvements de la Lune pendant ce laps de temps.

Mais un sujet que nous ne saurions passer sous silence, c'est l'ensemble de phénomènes très variés qui trouvent leur origine dans le refroidissement pur et simple du globe terrestre. Il est en effet évident que, par suite de la seule perte de sa chaleur propre, la profondeur souterraine doit à chaque instant modifier son état antérieur d'équilibre.

La mince pellicule solide qui, d'après les notions précédemment rappelées, constitue l'écorce terrestre enveloppante du sphéroïde fluide interne, ne jouissant pas de la rétractilité caractéristique des corps qui ne sont point à l'état solide et se trouvant à chaque instant trop grande pour suivre dans son contour les substances qu'elle contient, est sollicitée en même temps sans relâche à la déformation.

Il en résulte une série de conséquences dont il nous sera utile plus loin d'avoir dit un mot.

Parmi les phénomènes actuels qui peuvent ouvrir les plus vastes horizons sur le régime des régions internes de la Terre, de même que sur le fonctionnement des appareils physiologiques qui la constituent, il faut faire une place à part aux soulèvements et aux affaissements lents auxquels Elie de Beaumont a appliqué la dénomination satisfaisante de bossellements généraux.

La constatation, a eu cette fortune, d'ailleurs fréquente, pour les découvertes scientifiques de ces mouvements verticaux, de provoquer à maintes reprises d'énergiques protestations, depuis l'anathème prononcé en 1743 par le Parlement d'Upsal contre les premières assertions de Celsius et de Linné, jusqu'aux essais d'explication de

M. Suess pour la Scandinavie ¹, ou de M. Brückner pour notre côte normande ².

Les difficultés de détail qui ont arrêté ces observateurs doivent être réservées et ne peuvent en aucun cas diminuer la valeur du fait des plages soulevées, ou des forêts littorales submergées, comme il s'en présente sur une infinité de points.

Nous aurons à constater plus loin que le phénomène d'affaissement du littoral est indispensable à la continuation, sur un rivage donné, de la dénudation des falaises par la mer ; et l'on comprend comment la conséquence d'un semblable état de chose est le déplacement horizontal des bassins maritimes. Nous avons de tous côtés la preuve que la ligne des côtes est éminemment fragile et que les contours portés sur les cartes géographiques sont provisoires ; comme le dit élégamment Huxley : « les continents émigrent à la surface de la Terre. »

Il importe d'ailleurs de constater que la flexibilité de l'écorce terrestre ne saurait être indéfinie. Une torsion suffisamment accentuée doit amener à un certain moment une rupture et la manière dont celle-ci se produit, liée intimement à la valeur même de la limite d'élasticité de la matière tordue, entre tout naturellement dans le cadre de nos études du moment.

Tout d'abord, l'ouverture de la cassure se prête à des considérations qui dépassent de beaucoup les limites de notre présent chapitre, puisqu'elles concernent la génération d'un effet brusque par une cause lente et progressive. L'accumulation de la tension dans les profondeurs du sol ployé peut se réaliser à la faveur d'un laps de temps très prolongé et résulter d'efforts très petits tous dirigés dans le même sens ; puis tout à coup, l'addition du dernier de ces efforts insensibles à la série de ceux qui l'avaient précédé

1. *La face de la Terre* (traduc. française), t II, p. 667

2. *Compte rendu du IX^e Congrès géographique à Berlin*, 1891, p. 216.

détermine un déplacement violent, susceptible d'avoir des contre-coups à forme cataclysmienne sur une étendue plus ou moins vaste de la surface terrestre.

En second lieu, ce phénomène nous montre l'origine d'un très grand nombre de tremblements de terre qui pourraient se reconnaître à leur violence et aussi à leur isolement par rapport à d'autres phénomènes identiques. Car l'écorce brisée ne saurait se prêter de longtemps à une autre rupture dans le même lieu et il faut, pour que la torsion développe de nouveau ses effets, qu'une cimentation antérieure, une manière de raccommodage, ait ramené la continuité dans les masses qui viennent d'être rompues.

Seulement ce caractère d'isolement, tout réel qu'il soit, peut être ordinairement de constatation impossible, parce que la secousse consécutive à la rupture est fréquemment suivie d'autres secousses, qui peuvent lui ressembler intimement, et résultent cependant d'un mécanisme si distinct qu'il n'y a aucune raison pour y faire allusion ici et que sa description sera à sa place dans un chapitre tout différent.

En tous cas, la fissure ouverte dans l'écorce terrestre amenée par torsion à la limite de son élasticité, la *faille*, suivant l'expression technique, va jouer dans l'économie terrestre un rôle d'importance maîtresse. Ce sera un laboratoire où des substances variées trouveront le milieu favorable à leur production ; ce sera aussi la ligne directrice des grands accidents orographiques.

A ce dernier égard, il y aurait de bien curieuses remarques à faire, du côté historique de la question, sur les différentes opinions relatives à l'efficacité des tremblements de terre, quant à la surrection progressive des chaînes de montagnes. Ce fut un sujet de plaisanterie facile de la part des cataclysmiens que la prétention de faire des chaînes de montagnes par la superposition d'effets insensibles et l'on pourrait citer de grands professeurs

qui dans des chaires officielles se sont donné ce plaisir. Mais les choses changèrent peu à peu et bien des observations vinrent confirmer celles qu'on refusait d'admettre sur le seul témoignage de Lyell et de ses émules et il peut être utile d'en préciser ici le sens par des exemples.

Le 24 mai 1750 le port de Conception, au Chili a été mis à sec et en janvier 1855, le port de Nipon au Japon fut soulevé au point de n'être plus utilisable.

En 1861, une éruption du Vésuve s'accompagna de violents tremblements de terre surtout désastreux à Torre del Greco : depuis lors la côte, sur plusieurs centaines de mètres de longueur, a éprouvé un soulèvement permanent de 1 mètre environ.

Non seulement nous savons maintenant que les failles, dont l'ouverture ne peut pas se faire sans provoquer des secousses sismiques, sont productrices de chaînes de montagnes, mais nous pouvons encore pénétrer assez avant dans l'économie générale de l'orogénèse.

Les grandes chaînes montagneuses sont limitées par des failles grossièrement parallèles à leur alignement, et d'ordinaire les failles, plus ou moins nombreuses sont réunies en faisceau. Leur parallélisme approximatif n'est pas indéfini et bien fréquemment elles cernent des régions à contours plus ou moins elliptiques qui ont joué par rapport aux pays d'alentour.

L'effort orogénique qui a ouvert les failles et réalisé le rejet d'une de leur lèvres sur l'autre, s'est exercé perpendiculairement à la direction des grandes géoclines et, pour l'ordinaire, il en a fait monter le toit sur le mur ; de telle sorte que le type réalisé dans l'immense majorité des cas, c'est la faille dite « inverse » dans la terminologie de Schmidt. Et il est assez singulier que cet adjectif soit administré à la faille par excellence, auprès de laquelle la petite cassure, dite *directe*, des mines de houille, n'est qu'une sorte de miniature et d'exception. Les détails que j'ai

donnés sur elle dans ma *Géologie expérimentale*¹. me dispenseront de la décrire et je me bornerai à constater que nous savons bien qu'elle résulte avant tout d'efforts horizontaux développés dans l'écorce, par la contraction spontanée du noyau infra-granitique.

L'orientation générale de ces failles à la surface du globe doit être déterminée par une série de circonstances dont quelques-unes peuvent être aperçues et qui montrent à quel degré ont erré les premiers théoriciens qui se sont attaqués au problème.

Les pôles de la Terre, tout d'abord, semblent avoir joué un rôle des plus notables dans l'orientation générale dont il s'agit ou plus exactement des points peu éloignés du pôle et que j'appellerai *pôles orogéniques*. Dans une partie de la région qualifiée *d'ancien continent*, les grandes chaînes ont une tendance remarquable à suivre une direction plus ou moins normale aux méridiens. Pour l'Europe le fait est encore accentué par l'âge relatif des soulèvements parallèles qui se montrent d'autant moins anciens qu'ils affectent une localisation géographique plus méridionale. Aux temps les plus reculés, il a surgi dans l'extrême Nord, un continent auquel on a donné le nom de massif Archéen ; un peu au Sud-Est, se signale le ridement Calédonien, comprenant les Monts Grampians et les Alpes scandinaves et dont l'âge remonte à l'époque silurienne ; le ridement dit Armoricaïn, qui surgit sous le méridien de la Bretagne et se continue par les Sudettes jusqu'à la chaîne de l'Oural, s'est constitué avant les temps carbonifères ; le ridement qualifié d'Alpin, dont les Pyrénées, les Alpes, les Carpathes, le Caucase sont des chaînons successifs, s'est soulevé pendant la période tertiaire ; enfin le ridement appelé Apennin auquel se rattachent le Grand-Atlas, les îles de l'Archipel et jusqu'à l'Himalaya, est si récent qu'on peut penser que son soulèvement n'est pas

1. p. 290 et suivantes.

encore achevé. C'est de plusieurs manières qu'on peut rattacher un pareil état de chose à l'ensemble des réactions mécaniques qui prennent nécessairement naissance dans l'épaisseur du globe au cours du refroidissement séculaire et de la contraction corticale qui en est l'inévitable conséquence.

Mais on reconnaît aussi qu'un semblable régime s'accompagne nécessairement de réactions, qui sont conjuguées avec les précédentes dans un sens orthogonal avec le leur. Aussi les chaînes méridiennes doivent-elles tendre à s'associer dans une certaine mesure aux chaînes principales et c'est ainsi que l'Oural apparaît comme une addition à l'alignement jalonné par les monts de Bretagne, les Vosges et les Sudettes.

On peut même aller bien plus loin et remarquer le trait dominant de la physionomie du globe qui consiste dans l'association de deux grandes masses continentales dont les grands axes sont disposés sensiblement à 90 degrés l'un de l'autre (fig. 1). D'une part, le bloc formé par la réunion très intime de l'Eurasie avec l'Afrique s'allonge du Nord-Est au Sud-Est; et d'autre part l'ensemble des deux Amériques s'en va du Nord-Ouest au Sud-Est. Dans les deux cas les grandes chaînes montagneuses sont parallèles aux grands axes des continents et par conséquent aux efforts mécaniques dont ils sont les résultats.

Mais ce n'est pas tout : les particularités orographiques signalées pour le vieux monde et imitées expérimentalement, se retrouvent pour l'Amérique, pourvu qu'on admette la coordination des ridements successifs autour d'un centre différent. Pour l'Europe, le pôle de ridement se trouve nettement à l'ouest du pôle géographique. Pour l'Amérique, il affecte une situation sensiblement symétrique et se trouve fort à l'Est.

Mais cela posé, on trouve, par le travers de l'Amérique, des chaînes aussi rapprochées des méridiens (c'est-à-dire très imparfaitement) que celles de l'Europe sont rappro-

chées des parallèles, aussi peu rectilignes, mais affectant, comme elles, une ancienneté de moins en moins grande à mesure qu'on s'éloigne du pôle orogénique.

On rencontre d'abord, sur la côte Atlantique, les Apalaches qui, d'après les études de Dana, ont acquis leur relief aux périodes pré-siluriennes et qui font le symétrique plus ou moins exact du ridement Archéen de nos régions.

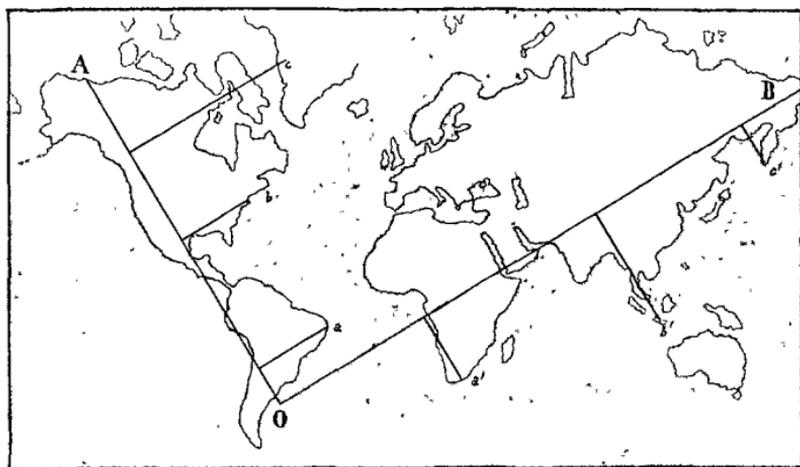


FIG. 1 — Planisphère suivant la projection de Mercator pour montrer la relation de situation des grands axes OA du Nouveau Monde et OB de l'Ancien Monde

Peut-être pourrait-on voir dans le soulèvement des Montagnes Vertes quelque chose de comparable à celui de la chaîne Calédonienne, qui est à peu près des mêmes temps.

Les Alleghanys, ayant pris naissance à la fin de l'ère primaire, pourraient se comparer au ridement Armoricaïn de M. Suess.

Les Montagnes Rocheuses, de soulèvement très prolongé, ressemblent au ridement Alpin par l'époque de leur maximum d'activité orogénique.

Enfin, la Cordillère qui longe toute l'Amérique du Sud

et qui pénètre dans le Mexique, quelque récente qu'elle soit et non finie, rappelle la chaîne Apennine.

Le fait même de la conjugaison orthogonale (très approximative, bien entendu, comme toutes les directions géologiques) est de nature à appuyer ces observations, car partout nous voyons des contre-coups à angles droits se produire, dans les expériences où le craquellement d'une croûte est obtenu.

En tout cas, il y a certainement, dans cet ordre d'études, des éléments nouveaux de discussion quant au régime des régions nucléaires, en proie à la contraction consécutive au refroidissement spontané de la Terre².

Il y a d'ailleurs dans la première production de ces grands accidents de la surface une raison pour qu'ils se continuent et s'accroissent dans les régions où ils ont pris naissance. Par exemple, le long des failles limites des grands blocs continentaux, le séjour de l'océan et la surcharge souterraine qu'il détermine, comme nous l'avons dit, doit tendre à augmenter progressivement la dénivellation côtière.

A cet égard, la côte S.-E. du vieux monde depuis la cap de Bonne-Espérance jusqu'au Kamtschatka serait l'homologue de la côte Sud-Ouest des Amériques depuis la terre de feu jusqu'à l'Alaska.

Ces deux lignes sensiblement rectangulaires (fig. 1), sont les deux segments de la ceinture de feu de l'Océan pacifique et ce fait tient justement à la présence de la grande géoclaste maîtresse qui établit à chaque instant des communications entre l'atmosphère et le laboratoire infragranitique.

Ces remarques suffisent pour montrer combien était dénuée de tout fondement tiré de la nature des choses l'hypothèse purement géométrique à la vérification de laquelle Elie de Beaumont a consacré la plus grande partie de sa longue existence.

1. *Comptes-rendus* CXXXIV, p. 998, (28 avril 1902).

La conception du réseau pentagonal ne pouvait naître que dans un esprit nourri de considérations qui sont précisément opposées à celles que doit accueillir le naturaliste.

L'abstraction remplaçait pour lui l'observation des faits et la conclusion ordinaire de ses études était invariablement qu'il y a eu des « causes perturbatrices » qui ont empêché la manifestations des caractères géométriques du globe. C'est un des exemples les plus complets que l'on puisse citer du danger de faire intervenir les méthodes mathématiques dans des sujets qui ne les comportent pas ; il y aurait profit à en tirer une règle de conduite dans une série de circonstances dont les diverses sciences naturelles nous procurent une longue série.

Le tétraèdre dans lequel, selon M. Lowthian Green et ses élèves, le globe terrestre doit se transformer par les progrès de sa contraction spontanée est d'ailleurs à citer dans la même catégorie que le réseau pentagonal et ne paraît pas avoir beaucoup plus que lui de racines sérieuses. On est même étonné de voir comment ses défenseurs emploient, au plaidoyer de sa cause, des arguments peu cohérents, changeant de valeur et de portée suivant les besoins de chaque moment. Si l'on fait remarquer que la Terre ne manifeste aucunement dans ses contours la tendance à la forme pyramidale, ils répondent que le tétraèdre est seulement *en puissance* ; mais cela ne les empêche pas de crier victoire et de prétendre que les faits confirment leurs vues, si M. Nansen annonce avoir trouvé dans la région du pôle Nord une mer remarquablement profonde.

Il y a là, bien évidemment, une contradiction criante qui nous retire jusqu'au courage de remarquer que cette mer « profonde » serait en tout cas de surface bien disproportionnée par rapport à la base que le tétraèdre devrait présenter.

Du reste, ce qui achève de nous édifier sur la portée de la « théorie tétraédrique » c'est que ses partisans sont loin

d'être d'accord à son égard sur les points les plus essentiels et avant tout en ce qui concerne son orientation d'après les lignes géographiques. Bien plus, on a été jusqu'à prétendre qu'il s'est succédé sur le globe, au cours des temps géologiques, toute une série de tétraèdres et l'on a même tracé sur des cartes la trajectoire de leurs sommets. Ce sont là de simples jeux d'esprit auxquels on peut trouver un grand plaisir, mais qui ne sauraient procurer à la science le moindre progrès sérieux.

Il est bien clair pour tout le monde que la formule mathématique est l'expression la plus satisfaisante des faits : quand on saura tout réduire en formule, la science sera parfaite. Mais actuellement, les questions de l'histoire naturelle sont bien trop complexes et bien trop difficiles pour qu'on puisse songer à les amener à cet état.

« On peut comparer les mathématiques, a dit Huxley, à un moulin d'un travail admirable, capable de moudre à tous les degrés de finesse ; mais ce qu'on en tire dépend de ce qu'on y a mis, et comme le plus parfait moulin du monde ne peut donner de la farine de froment si on n'y met que des cosses de pois, de même des pages de formules ne tireront pas un résultat certain d'une donnée incertaine. » Et il est évident que, pendant longtemps encore, la Géologie ne saura fournir aux mathématiques que des « données incertaines. »

En ce moment du reste, nous assistons à une vraie *faillite* de la mathématique géologique, et justement dans un des sujets où elle s'était vantée, avec le plus d'assurance, d'être décisive : dans l'histoire des montagnes.

Il ne reste absolument plus rien des assertions d'Élie de Beaumont. A la suite de M. Ed. Suess, tous les géologues sont d'accord pour refuser aux chaînes de montagnes une direction rectiligne et une époque définie de soulèvement.

On voit dans chacune d'elles le résultat d'efforts indéfiniment continués en conséquence du phénomène pri-

mordial de contraction spontanée du noyau fluide et chaud de la terre, et nulle confirmation plus éclatante ne peut être donnée au principe de la continuité des temps géologiques.

Ce qui précède suffit à montrer que l'écorce du globe, considérée seulement comme tégument flexible, remplit dans l'organisme terrestre des fonctions parfaitement définies. Protégeant les régions externes du flux calorifique venant de l'intérieur, elle se modèle à chaque instant sur les dimensions du noyau toujours plus petit qu'elle enveloppe : c'est au prix de refoulements amenant des remplis et des fractures qu'elle y parvient et la conséquence de ce travail incessant c'est la constitution de reliefs et de dépressions grâce auxquelles d'autres départements de la physiologie planétaire pourront se développer.

2 — LE VOLCAN

Par la netteté de sa forme, comme par la précision de ses conditions de gisement, le volcan constitue l'un des mécanismes les mieux définis de toute l'anatomie terrestre. La fonction physiologique à l'accomplissement de laquelle il est attaché peut sans peine être caractérisée.

C'est une communication établie entre l'atmosphère et les régions infra-tégumentaires du globe et par conséquent l'un des centres les plus actifs des phénomènes circulatoires. Nulle part ailleurs on n'assiste à un pareil brassage de matériaux provenant d'origines plus opposées.

Les cendres et les lapilli qu'il projette dans l'atmosphère et qui, après leur chute, collaborent à la sédimentation aqueuse, les laves qu'il bave sur le sol ou qu'il injecte dans les roches, viennent compliquer singulièrement la structure de la croûte rocheuse, au point qu'il en est résulté l'une des plus célèbres méprises dont l'histoire de la science est cependant si riche. C'est en effet, à la vue des

nappes injectées, intimement associées aux sédiments dont ils ont toutes les allures, que Werner et ses élèves ont donné un éclat si vif et si provisoire à l'École neptuniste. Mais c'est plus récemment, à la rencontre des assises de tufs volcaniques de tous les âges, qu'on a reconnu l'unité des phénomènes d'éjection depuis les périodes les plus anciennes, et qu'on a renoncé à cette distinction si conforme à la vieille doctrine cataclysmienne, entre la période des volcans à cratères et les temps qui l'ont précédée.

Nous savons maintenant que déjà à l'époque précambrienne des bouches ignivomes remplissaient les fonctions dévolues aux volcans de nos jours et il en résulte pour le volcanisme même un accroissement considérable.

Malgré diverses objections de détail, dont plusieurs du reste ont un intérêt sérieux et ne sauraient être considérées comme non avenues, on peut résumer la signification la plus générale du volcan en disant que c'est un organe par lequel l'eau accomplit une circulation verticale au travers d'une grande portion de l'écorce terrestre.

A ceux qui s'étonneraient de cette assertion que le volcan est avant tout un appareil hydraulique, il suffirait de présenter les évaluations faites, dans les conditions les moins dépourvues de certitude, de la masse d'eau rejetée des entrailles souterraines par les éruptions, et qui chiffrent par une vingtaine de milliers de mètres cubes, la quantité d'eau supposée liquide qu'un cratère émet chaque jour.

A première vue le volcan consiste dans un conduit souterrain ou *cheminée* et dans un appareil externe ou *cratère*; mais en s'en tenant à cette constitution, il serait impossible de concevoir le jeu du mécanisme volcanique. La cheminée et le cratère ne sont que les chemins de décharge du laboratoire où s'élaborent les produits d'éruption et qui doit être alimenté des matériaux qu'il transforme par tout un organisme spécial.

Celui-ci comprend l'enceinte dans laquelle les substances rocheuses, destinées à devenir lave ou cendres, sont

soumises à la haute température de la liquéfaction complète, et les sources d'où dérive l'eau qui doit s'incorporer par occlusion dans le magma de façon à le rendre *foisonnant*.

Pour ce qui est du premier point, l'idée la plus simple et qu'on a eue d'abord c'est que la cheminée volcanique se prolonge au travers de toute l'écorce rocheuse et s'alimente dans la nappe de matériaux qui n'ont pas encore pris l'état solide. En y réfléchissant pourtant, on trouve à cette conception de très grands obstacles et l'on se demande si, précisément sous l'influence de l'eau surchauffée parvenant à son contact, la matière de zones moins profondes et par conséquent solidifiée ne redeviendrait pas pâteuse et même liquide, de façon à pouvoir surgir par les cheminées opportunément ouvertes.

Une raison pour ne pas repousser cette objection c'est que dans les expériences réalisées par la méthode de Sénarmont on voit des roches et des minéraux perdre leur forme et par conséquent leur consistance bien au-dessous de leur point de fusion à l'air. Et une raison pour l'accueillir c'est que la pénétration de l'eau aux soixante kilomètres le long desquels nous sommes conduits par la loi de distribution de la chaleur souterraine à reporter la limite de la coque flexible, paraît tout à fait impossible.

Car il ne faut pas se dissimuler que l'eau dont les volcans sont si prodigues n'est pas renfermée de toute antiquité dans les profondeurs terrestres et doit être fournie aux régions inférieures par une contribution continue de la surface ; ce qui nous ramène à rechercher les sources d'où dérive cette eau d'alimentation.

Trompés par une coïncidence de gisement, fréquente mais non constante et qui tient à une communauté de causes antérieures, des grandes lignes de côtes comme le long du Pacifique et des chaînes de volcans, bien des géologues ont posé en fait la nécessité pour les localités volcaniques du voisinage de la mer. Les exemples cepen-

dant ne manquent pas qui démontrent l'indépendance possible de ces deux termes, et il suffit de rappeler l'altitude et la situation continentale des volcans géants de Quito pour mettre la question hors de cause.

Aussi, et malgré les tentatives de Gay Lussac et d'autres auteurs, faut-il renoncer à chercher dans la mer la source d'eau des volcans, dût-il s'agir des volcans littoraux ou même des volcans sous-marins.

Notre opinion, fondée sur plusieurs ordres de considérations, c'est que le volcan est alimenté en eau par l'écrasement, le long des failles souterraines, de blocs pourvus de l'eau d'imprégnation qui caractérise les assises les moins profondes de la croûte du globe. La fig. 2 rappelle un fait normal dans les *failles*, visible dans bien des filons où des fragments T, empâtés dans la masse proviennent des portions hautes des lèvres de la cassure. Il suffit de supposer que T représente la zone rocheuse pourvue d'eau de carrière et G celle où cette eau n'est point encore parvenue, pour admettre que de l'eau, imprégnant les blocs descendus soit parvenue aux niveaux de volatilisation ou même de dissociation.

Quand j'ai jeté d'abord dans la circulation cette conception qui donne à l'eau, comme véhicule¹, des blocs solides entraînés par la pesanteur, les critiques n'ont pas manqué et l'on a dit par exemple que les failles des terrains très profonds ne montrent point entre leurs lèvres les brèches si normales à des niveaux plus élevés. Pourtant depuis lors, on a signalé en plein gneiss des brèches de froissement très comparables aux précédentes.

Il est intéressant, du reste, de noter ici sans rattacher le fait à ma publication, cette coïncidence au moins remarquable, qu'après avoir vainement tenté pendant plus de vingt ans de trouver un procédé de pénétration de l'eau de surface dans les profondeurs, (sujet qui entre autre a

1. *Comptes rendus*, t. XCII, p. 1280 (1883).

provoqué les efforts répétés de Daubrée) on a renoncé tout à coup à considérer le problème comme intéressant. Quelques personnes sont allées jusqu'à contester à l'eau la part décisive qu'elle a dans les phénomènes volcaniques et ont montré une sorte d'appétit à généraliser, même sans contrôle, les résultats obtenus par Green à l'égard des volcans d'Hawaï qui émettraient non de la vapeur d'eau mais de l'acide chlorhydrique.

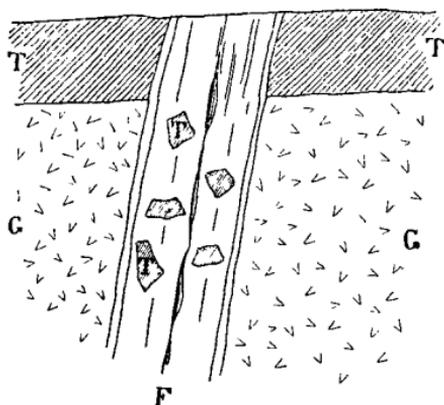


FIG 2 — Coupe d'une faille filonienne F montrant le fait très fréquent de l'éboulement de fragments T des portions hautes de la cassure jusqu'au niveau des masses G inférieures. L'application de ce fait aux régions profondes où il amènerait la précipitation de roches pourvues d'eau de carrière, à des niveaux à très haute température entre légitimement la théorie des phénomènes volcaniques

Or cette dernière circonstance, en condamnant à tout jamais les anciennes vues sur la pénétration de l'eau marine dans les laboratoires infra-volcanique, paraît au contraire tout à fait favorable à l'hypothèse des précipitations rocheuses, car il n'y a aucune difficulté à concevoir que le même mécanisme qui fait tomber des blocs mouillés dans les failles peut y introduire de même des fragments de roches dont la décomposition engendrerait une autre matière volatile et élastique que l'eau et par exemple l'acide chlorhydrique.

Des chlorures, comme le sel gemme, seraient dans ce

cas et dégageraient des gaz capables de rendre compte des phénomènes jusqu'ici regardés comme aberrants.

Nous avons d'ailleurs, dans certains cas, des preuves bien concluantes de l'intervention des principes volatils dans l'ascension et, sans doute, dans la constitution des roches éruptives. Outre que certaines portions des coulées, même celles d'une haute antiquité géologique, comme les amygdaloïdes du lac Supérieur, sont véritablement criblées de cavités postérieurement incrustées de minéraux variés et qui sont à n'en pas douter le moulage de bulles de gaz et de vapeurs, le microscope révèle dans la substance de beaucoup de cristaux constitutifs, des inclusions de gaz ou de liquides volatils représentant des échantillons du milieu générateur.

C'est ici qu'il convient en outre de constater que la chute de roches hydratées dans les profondeurs très chaudes, en même temps qu'elle rend compte de la mise en possession par le magma fondu des principes volatils qui lui donneront le pouvoir ascensionnel des laves, détermine parfois, à la faveur de dispositions souterraines favorables, le développement d'actions mécaniques dont les contre-coups à la surface du sol sont fréquemment très sensibles (fig. 3).

Il s'agit des tremblements de terre que nous devons considérer comme volcaniques et qui tout en étant associés aux séismes orogéniques qui nous occupaient à propos de l'écorce flexible, sont dus pourtant à une cause nettement différente.

Leur allure en effet est toute autre et ce qui la caractérise avant tout c'est l'ordinaire répétition à laquelle le phénomène se montre enclin.

La fonction corticale dont nous nous occupions précédemment, intervient de son côté par le faillage, et d'une manière tout à fait décisive, dans l'alimentation en eau des régions très profondes. Les grandes failles « inverses », spéciales aux manifestations orogéniques, amènent à cha-

que instant le recouvrement d'assises pourvues d'eau d'imprégnation par des masses venant de profondeurs plus grandes et pourvues, en conséquence, d'une température plus élevée : la volatilisation de l'eau et son occlusion dans les roches voisines, dont elle abaisse le point de fusion pendant qu'elle leur communique la propriété foisonnante qui les rend volcaniques en sont les résultats nécessaires.



FIG. 3 — Disposition souterraine propre à engendrer le choc sismique par la précipitation le long des géoclastes de blocs rocheux imprégnés d'eau jusque dans les régions souterraines dont la haute température doit déterminer la brusque volatilisation de l'eau.

La vue des éruptions volcaniques nous apprend que l'ascension des laves jusqu'au sommet de l'Etna, c'est-à-dire à 3 000 mètres d'altitude, est de tout point comparable à l'extravasement d'une eau gazeuse ou du vin de Champagne hors de sa bouteille restée debout, mais dont le bouchon a été brusquement retiré. Et, de même que dans le Champagne, nous sommes assurés que les bulles gazeuses augmentent de diamètre en s'élevant au travers

du dissolvant dont elles viennent de se dégager et qu'elles entraînent. Il arrive même un moment où dans le bas de la colonne liquide l'extraction du gaz a été à peu près complète, de sorte que si la consolidation s'en faisait, on n'y trouverait aucune trace du fluide élastique dégagé, ce qui explique la compacité des régions basses des coulées comparée à la bullosité des régions supérieures.

Les roches volcaniques qui s'épanchent sur le sol et qui se solidifient dans les parties hautes des cheminées ne peuvent cependant pas nous renseigner sur toutes les conditions dont s'accompagne, dans des régions plus profondes, la cristallisation des poussées rocheuses dont elles ne sont que le couronnement. En les comparant aux roches émises aux époques antérieures, dont les « chapeaux » au contraire ont été supprimés par les opérations dénudatrices et qui se révèlent à nous seulement par leurs racines, maintenant parvenues au jour, nous pouvons par la pensée reconstituer toute la colonne relative à une éruption complète.

En faisant cette synthèse et en laissant leur part aux influences relatives aux différences d'âge et aux actions possibles des masses encaissantes, on arrive à concevoir qu'un même « magma » donne naissance à des types lithologiques très variés dans les différents points du massif qu'il constitue. Il ne répugne pas à l'esprit d'admettre que les coulées de basalte ou de lave se continuent en profondeur par des roches de plus en plus différenciées et qu'à la base se sont élaborés les termes opposés, c'est-à-dire acides, de la série générale.

Le même examen nous éclaire aussi sur la disposition souterraine des cheminées volcaniques, visibles seulement pour l'époque actuelle par leur issue supérieure, mais que des coupes mettent à découvert en sens variés pour les périodes anciennes. Tantôt ce sont des conduits plus ou moins cylindriques et tantôt ce sont des fissures rappelant exactement la disposition des failles.

Pour ce qui est des perforations cylindriques, maintenant remplies des produits d'éruption, elles se rencontrent à tous les niveaux et l'on y découvre des roches de tous les types, depuis les granits du Cornouailles jusqu'aux diabases de l'Écosse et aux basaltes de notre Plateau central. Malgré la supposition d'une ouverture soudaine au travers de roches continues, il semble démontré qu'elles ne sont qu'une forme d'accidents en certains points des failles.

Daubrée, qui les a étudiées et leur a donné le nom de *diatrèmes*, indiquant une perforation dans une masse cohérente, n'a pu cependant les imiter qu'en opérant sur des roches préalablement fissurées et il reconnaît, tant dans le Transvaal que dans le Velay et ailleurs, leur alignement le long des directions de géoclasses. D'ordinaire, c'est à l'entre-croisement de deux failles que l'érosion produite par les matériaux dégagés des profondeurs amène la perforation de la cheminée. Mais il est évident que, dans la plupart des cas, ces perforations doivent constituer de simples accidents locaux d'un phénomène clastique beaucoup plus général; aussi les « necks », comme dit M. Geikie, c'est-à-dire les poussées cylindriques de roches, doivent-ils partir de vrais « dykes » ou filons qui, dans la profondeur, leur servent de racine commune. C'est donc comme confirmation de ces vues qu'on peut rappeler l'association en certaines chaînes montagneuses, comme le Caucase ou les Andes, des volcans à cratères avec les poussées rocheuses qui font l'axe du soulèvement. Et c'est sous forme d'annexe du phénomène volcanique que nous apparaît la surrection de l'épine dorsale cristalline des massifs constitués comme les Alpes ou les Pyrénées.

Il ne faut pas oublier que ces massifs ne sont plus que les portions basilaires des régions constituées lors de leur soulèvement. La dénudation colossale dont ils ont été le théâtre depuis leurs débuts en a retiré tout ce qui nous procurerait la liaison matérielle avec les phénomènes récents, et c'est à cause de récurrences d'activité

profonde dans les mêmes régions progressivement fort modifiées par les actions externes, que nous y rencontrons côte à côte des produits éruptifs nettement différents les uns des autres. On peut croire qu'une dénudation suffisante des Andes y ferait apparaître un axe cristallin semblable à celui des Alpes.

Enfin, il faut faire allusion dans cette revue rapide aux actions exercées par les éruptions rocheuses sur les masses qu'elles ont recoupées. Sous leur effort ascensionnel, les terrains ont été disloqués, redressés et leurs strates ont été contournées, de façon parfois fort compliquée ; sous l'influence de leur température élevée et du cortège des principes variés qui ont été émis en même temps et qui, d'ailleurs, ont d'ordinaire joué, comme on l'a vu, le rôle de moteur dans le phénomène éruptif, ces mêmes terrains encaissants ont été modifiés dans leur composition intime.

Ce sont là des effets réunis d'ordinaire sous le nom de *métamorphisme de contact*, et nous savons que leur résultat nécessaire est de rapprocher singulièrement par leurs caractères les plus importants les roches sédimentaires des roches cristallines.

Autour du volcan actuel, le sol présente fréquemment les altérations dont il s'agit, mais réduites à ce que nous pouvons observer à la surface exacte du sol. Les argiles y sont cuites, les grès prismatisés et il est certain que ces produits ne diffèrent autant des produits du métamorphisme ancien qu'en raison du voisinage immédiat de l'atmosphère, dont la faible pression s'est opposée au développement des produits minéralogiques qu'engendre l'eau suréchauffée.

Si nous pouvions descendre le long des colonnes souterraines de basalte, nous verrions sans aucun doute les effets s'accroître en même temps que la profondeur augmenterait. La rencontre des marbres dérivés de la craie sur une falaise pareille à celle d'Antrim est à cet égard une démonstration sans réplique. Les mâclines, qui font

en Bretagne de larges auréoles aux éruptions de granit nous procurent sans doute le terme le plus accusé de cette longue série, car si la cristallisation y était un peu plus parfaite et si toute trace de fossile y avait en conséquence été supprimée, nous n'aurions plus aucun moyen d'en distinguer le produit des roches fondamentales proprement dites.

Les salzes et les volcans de boue, même si le laboratoire où ils s'alimentent n'est pas identiquement le même que celui qui donne son activité au volcan proprement dit, se présentent encore à nos yeux comme des points de sorties de courants ascendants de matières chaudes, et constituent comme des apophyses de l'appareil volcanique. Nous verrons qu'ils jettent du jour sur l'histoire de certains gîtes métallifères, de même que les fumerolles et les mofettes, dont les liens avec le volcan sont beaucoup plus faciles à voir d'un simple coup d'œil.

La conclusion de ces diverses observations est bien, comme nous le disons au début, que le volcan, considéré au point de vue où nous sommes placés, est un mécanisme qui assure la circulation verticale de l'eau au travers d'une grande épaisseur de l'écorce du globe. Cette eau, précipitée dans les profondeurs par les égrugements de matériaux sur les bords de grandes géoclasses ouvertes par un procédé déjà décrit, ou encore par la production des grandes failles orogéniques, se dissout dans le bain de roches fondues qu'elle rencontre dans les abîmes souterrains et contracte avec elles par occlusion une sorte de combinaison à propriétés foisonnantes ou explosives. L'ouverture d'une cassure établit la communication entre le réservoir ainsi chargé et l'atmosphère, et permettant à ces propriétés foisonnantes de s'exercer, donne lieu à l'éruption : l'eau, entraînant avec elle son dissolvant, se dégage vers la surface sous forme de vapeurs. Elle projette dans les airs des nuages de « cendres » et des montagnes de « lapilli », puis elle extravase les

laves, qui s'étendent plus ou moins loin à la surface du terrain, ou plus bas s'insinuent dans les diastromes des massifs traversés ; qui enfin, quand la force élastique de l'eau est épuisée, s'arrêtent dans la cheminée et s'y solidifient sous forme de « necks » ou de « filons ».

C'est à cause de cette prédominance de l'eau dans le phénomène volcanique qu'il est absolument impossible d'en séparer des émissions aqueuses dont la série comprend des types fort divers et conduit de proche en proche au jaillissement de simples sources ascendantes. Tout le monde admettra le caractère volcanique des geysers qui fournissent de véritables éruptions et dont la lave, dépourvue presque totalement de matières fixes, semble consister en vapeur d'eau dissoute dans l'eau liquide comme par une sorte d'occlusion. Si l'intermittence du jet des geysers leur procure une caractéristique bien nette, il ne faut pas oublier que certains volcans, comme le Stromboli, sont depuis des siècles en état d'éruption continue et dès lors comparables à maintes sources chaudes qui, comme à Ischia, sortent du sol sans relâche et traversent des assises dont la constitution volcanique ou éruptive est manifeste. Sans compter que parfois les éruptions volcaniques du voisinage apportent dans leur régime des perturbations plus ou moins passagères et qui sont bien éloqu岸tes.

En conséquence de tous ces faits, la profondeur de la croûte terrestre nous apparaît comme traversée par les ramifications d'une circulation aqueuse très compliquée dans sa forme et qui entraîne en différents sens des substances extrêmement diverses. Mais cette circulation amène aussi à la surface une somme énorme d'énergie originaire des profondeurs et qui se manifeste soit en action mécanique comme dans les chocs sismiques, les raz de marée, les ondes atmosphériques dont le Krakatau a fourni de si beaux exemples, soit en chaleur qui développe les réactions métamorphiques et bien d'autres effets, soit

en électricité si nettement révélée dans l' « orage volcanique. »

3 — LA NAPPE D'EAU PROFONDE

C'est parmi les appareils dont les fonctions physiologiques sont le plus constamment sensibles qu'il faut ranger le système des cavités de tous genres et de toutes dimensions; depuis les pores microscopiques qui séparent les éléments minéraux jusqu'aux cavernes les plus vastes, au travers desquelles circulent sans cesse des masses d'eau arrivées dans le sol par absorption.

La ressemblance d'ailleurs ne lui manque pas avec le système circulatoire des animaux et des plantes qui comprend des vaisseaux et des lacunes et l'analogie dépasse le simple point de vue morphologique pour s'étendre au domaine fonctionnel. Il y a là, en effet, une cause déterminante de déplacements et de substitutions de matières aussi bien que de répartition des températures internes.

C'est une notion maintenant acquise que toutes les roches sans exception contiennent de l'eau interposée entre leurs éléments minéraux, même quand ceux-ci sont parfaitement anhydres. Delesse a publié à cet égard des chiffres qui démontrent l'ubiquité de l'eau de carrière et dont la conséquence est que le volume d'eau dès maintenant engagé dans cette association avec les roches est bien des fois supérieur à la masse entière des océans.

Mais ce sur quoi il faut insister tout d'abord c'est que cette eau n'est pas immobile, est au contraire en voie de circulation ininterrompue et que son mouvement sans cesse renouvelé suffirait déjà, en dehors de toute autre considération, pour animer singulièrement la profondeur du milieu géologique et pour lui donner une apparence de vie.

Pour bien comprendre les grandes lignes de cette circulation souterraine, il faut se rappeler les traits les plus essentiels de structure de la croûte terrestre. De grandes masses rocheuses y sont régulièrement associées et présentent la forme de plaques sur les plans de jonction desquelles il existe d'ordinaire un minimum de cohésion, — la notion s'appliquant aussi bien aux roches dites massives, comme les granits qui sont divisés en épaisses assises et même aux roches éruptives dans leurs rapports avec les masses encaissantes, qu'aux roches stratifiées elles-mêmes.

A quelque catégorie qu'elles appartiennent ces roches sont en outre différentes les unes des autres quant à la facilité plus ou moins grande qu'elles offrent à la circulation de l'eau, et certaines d'entre elles, qui sont qualifiées de perméables, se laissent imbiber très aisément. Les sables et surtout les graviers sont au premier rang parmi les roches perméables, mais on doit classer avec eux, non seulement les roches très fissurées comme la craie de Champagne et le granit de bien des points de Bretagne et du Plateau Central, mais des masses parfaitement cohérentes, comme le calcaire à millioles, dit pierre à filtrer, et qui sont éminemment poreuses.

A l'encontre, d'autres roches sont dites imperméables parce que l'eau est retenue à leur surface et l'argile doit nous servir de type pour cette catégorie, à laquelle appartiennent la plupart des roches massives non fissurées comme le porphyre, le granit et leurs analogues. Dans la pratique, les roches imperméables sont extrêmement rares, les porphyres parce que partout ils sont traversés de fissures où les eaux peuvent s'infiltrer, beaucoup d'argiles même, jusque dans certaines variétés relativement pures, sont accessibles à l'eau qui les traverse quoique avec beaucoup plus de lenteur, — c'est ce que des expériences directes ont montré. Il suffit d'ailleurs du mélange d'une très petite proportion de sable pour que la perméabilité devienne très sensible.

Dans la plupart des régions de la Terre, les roches perméables et les roches dites imperméables sont diversement associées ensemble et il résulte de leurs agencements, la constitution de *niveaux d'eau* subordonnés aux masses perméables et supportés par les masses imperméables dans des situations très variées.

Si les couches du sol étaient horizontales et continues, il se ferait ainsi un certain nombre de nappes qui tendraient vers un état statique définitif et peu à peu toutes les eaux de l'atmosphère tombées sous forme de pluie iraient s'emmagasiner dans les profondeurs. Partout, même avec une horizontalité supposée absolue, cette conception rencontre bien des objections, et il suffit que la surface du sol soit accidentée de collines et de vallées pour que, ici ou là, les contacts mutuels des niveaux perméables et des niveaux imperméables sous-jacents viennent affleurer à la surface. Dès lors il y a écoulement de l'eau au dehors et, de proche en proche, circulation de l'eau souterraine.

Mais il y a d'autant moins à s'arrêter au développement de ce détail que jamais les couches ne sont vraiment horizontales et dès lors, la pesanteur intervient non seulement pour faire descendre l'eau d'imbibition dans la masse des roches perméables, mais pour la faire s'écouler suivant la déclivité du support imperméable qu'elle ne tarde jamais à rencontrer. Voilà, immédiatement, une cause de vide relatif pour les parties hautes, un appel pour les réservoirs possibles d'alimentation nouvelle et une circulation commencée.

Il est vrai qu'elle devrait s'arrêter si les couches plongeantes n'arrivaient pas tôt ou tard à des localités de décharge de l'eau qui s'écoule dans leur masse ; mais nous allons constater des types divers de canaux de remonte offerts aux eaux profondes et dont elles profiteront d'autant plus facilement que, selon les cas, elles y seront poussées soit par la pression hydrostatique, soit par leur transformation plus ou moins partielle en vapeur comprimée.

Dans le grand ensemble de la circulation aqueuse souterraine il est indispensable de faire une distinction entre deux appareils analogues entre eux par certains détails, mais différents l'un de l'autre par l'essence, et que nous désignerons sous les noms de *nappe d'eau souterraine profonde* et de *nappe d'eau superficielle*. La première est caractérisée par ce fait qu'elle est séparée de la surface du sol par une masse rocheuse imperméable tandis que l'autre imprègne la roche perméable, d'épaisseur d'ailleurs quelconque, qui constitue la surface du sol.

Il résulte de cette différence des caractères très nettement distinctifs au double point de vue du régime mécanique et de la composition chimique. Au premier égard, la nappe d'eau superficielle ne peut pas comme l'autre subir des poussées hydrostastiques et être jaillissante ; au second, la nappe profonde ne peut pas être chargée des gaz atmosphériques et réaliser des réactions qui sont du domaine de l'autre. En outre, elle n'est pas partout souterraine et possède des régions exposées au grand air.

Pour le moment, considérons seulement la nappe d'eau souterraine profonde c'est-à-dire celle qui est séparée de la surface du sol par des roches imperméables. Elle est très discontinue et, verticalement, elle présente des maxima et des minima, en rapport avec diverses circonstances. Son épaisseur est inégale et limitée par en bas à la surface des zones de température suffisamment élevée.

A cet égard il faut signaler une circonstance importante.

L'écorce flexible s'étant constituée comme on sait par la consolidation périphérique du sphéroïde nébuleux primitif et s'épaississant dans sa région interne par le placage successif des éléments qui perdent leur fluidité, elle est appelée à remplir, en conséquence de ces circonstances, tout un ordre de fonctions dont il nous reste à dire un mot.

Devenue, à l'égard des régions tout à fait externes, un écran protecteur contre les radiations thermiques venant

du centre, elle n'a pas tardé à se constituer à l'état de support des matières dérivées des condensations atmosphériques. C'est ainsi qu'elle est devenue le fond des océans primitifs et le siège, par conséquent, des premières sédimentations.

L'eau marine n'a d'ailleurs pas longtemps limité son séjour au-dessus de ce fond rocheux : le refroidissement progressif de celui-ci lui a permis de s'y insinuer peu à peu par porosité et à partir, de ce moment, la croûte flexible conjonctive des zones ignées du dedans et de la masse aqueuse du dehors s'est subdivisée en deux régions concentriques dont la plus extérieure contrastait avec l'autre par la présence de l'eau qui l'imprègne.

Nous avons déjà vu les conséquences possibles de ces coexistences d'une coque humidifiée et d'une autre coque plus interne à température supérieure à celle qui tolère la persistance de l'eau. Pour le moment, il suffit de constater que, par la force des choses, l'épaisseur de la zone mouillée tend à s'accroître constamment par en bas, gagnant à chaque instant les régions qu'un certain degré thermométrique abandonne. Que le phénomène soit lent ou rapide, il n'en est pas moins certain et les conséquences en sont inévitables.

L'une des plus évidentes, c'est que l'eau qui imprègne ainsi petit à petit les profondeurs souterraines étant sans nulle collaboration possible venant d'autre part, fournie en totalité par la masse océanique, le volume des mers doit nécessairement diminuer progressivement. Les calculs basés sur les résultats d'analyses des roches, tels que ceux auxquels Delesse s'est livré, ne permettent pas de douter que toutes les eaux marines ne soient destinées à s'engloutir dans les interstices cristallins des roches profondes ; et il est d'autant moins téméraire d'entrevoir, à la suite de ce dessèchement universel l'absorption capillaire de l'atmosphère elle-même, que la Lune, où les eaux ont laissé tant de traces de leur ancien séjour, se montre

désormais privée absolument de tout revêtement fluide. J'ai traité ce sujet dans ma *Géologie comparée* et je me borne ici à le mentionner.

Il convient pourtant d'ajouter que l'observation stratigraphique paraît démontrer que, depuis le temps primaire, l'importance de la mer a été constamment en diminuant à la surface du globe. Et sans y insister, je rappellerai que l'examen des astres qui ressemblent le plus à la Terre confirme la notion d'une absorption progressive des océans par la portion nucléaire des corps planétaires.

Pour en revenir à l'examen de l'hydrodynamique du sous-sol, nous devons énumérer quelques causes différentes de la pesanteur et qui viennent ajouter leurs effets aux siens, pour provoquer la circulation des eaux au sein des roches. Certains d'entre eux sont purement physiques, d'autres ont un caractère chimique ; le plus souvent ils collaborent à la même œuvre, et agissent simultanément.

Une couche du sol pourvue de son eau de carrière peut être considérée comme une éponge saturée. Du fait de son recouvrement par des sédiments plus récents, cette couche comprimée prend un autre état et procure à l'eau interposée des impulsions consécutives. Le phénomène est continu et variable d'intensité avec le temps.

Dans une foule de cas, la capillarité intervient sur une échelle très importante pour assurer la circulation interstitielle. Et le phénomène s'accroît quand la roche mouillée déjà reçoit l'imprégnation d'une eau tenant en dissolution une petite quantité d'un sel soluble. Il se fait alors des frémissements, que l'emploi de liqueurs colorées et l'observation à la loupe peuvent rendre très instructives. Pratiquement, on remplit un gros tube de verre, ou mieux une éprouvette à dessécher, d'une poussière rocheuse saturée d'eau, telle que la craie blanche tamisée puis on la recouvre d'une mince couche de la solution colorée et l'on suit les progrès de la pénétration.

Si la plus faible réaction chimique peut intervenir, par exemple si le second liquide agissant sur la craie contient des traces d'un sel de fer, alors le phénomène en reçoit une très notable accélération, et l'on voit des petits courants très actifs se déclarer de tous côtés, favorisés par les bulles microscopiques d'acide carbonique, — souvent même sans qu'il y ait de bulles, — la petite quantité de l'anhydride se dissolvant pour donner du bicarbonate calcique. J'ai fait dans ce sens des expériences nombreuses et variées.

J'ai employé le calcaire de Lerouville en très petits grains, mais non en poussière, recouvert de sable quartzeux et j'ai arrosé de sulfate de fer : on voit alors des *réseaux* se dessiner en jaune et dans ces réseaux on constate à la loupe un travail de circulation qui est en rapport avec la réaction chimique qui s'établit et qui rappelle intimement par son allure la vue des tissus vivants traversés par une circulation.

On conçoit comment la circulation interstitielle doit être provoquée et accentuée par les hydratations de certains minéraux, qui fixent une quantité plus ou moins considérable d'eau, ainsi dans les limons feldspathiques qui s'argilifient ; ou au contraire, par les substances qui deviennent progressivement anhydres comme les concrétions de silice gélatineuse qui, dans la craie et dans d'autres roches, deviennent du silex et même du quartz hyalin.

De sorte qu'il est permis de dire que ce n'est pas seulement parce que les eaux circulent dans le sol que certaines réactions se produisent au sein des roches : c'est, réciproquement, parce que ces réactions se produisent que, dans certains cas, la circulation des eaux a lieu.

L'association aux pores des roches de vides de dimension sensible apporte à la circulation de la nappe d'eau souterraine une série innombrable de caractères variés. Les géoclasses plus ou moins verticales composent avec

les diastromes un réseau de canaux qui permettent, avec une aisance variable en chaque point, le lavage du sol par les eaux sollicitées à descendre par la pesanteur.

Il arrive qu'en conséquence de leur forme, des niveaux aquifères peuvent être saturés d'eau, aussi bien dans des roches fissurées, comme la craie, que dans des roches incohérentes, comme le sable, ou délayables comme les argiles.

Dans ces derniers cas, les couches acquièrent des propriétés spéciales qui tiennent de celles des liquides et dont la plus remarquable est la fluidité. Il y a longtemps qu'on a à compter avec les difficultés techniques qui résultent d'un semblable état de choses et tout le monde sait, par exemple, les grands travaux et les ingénieuses méthodes auxquels on a eu recours contre le « torrent d'Anzin », c'est-à-dire le niveau de sable saturé qui surmonte la houille dans une partie du département du Nord.

Les géologues ont, dans ces derniers temps, étudié spécialement les circonstances qui amènent la fluidité dans les sables qu'en Belgique on désigne sous le nom peu harmonieux de « boulant ».

On a eu tout récemment à compter avec l'écoulement d'argiles saturées, dans la traversée par le tunnel de Meudon, des marnes inférieures aux sables de Fontainebleau recouverts eux-mêmes des marnes imperméables de la Beauce. Dans ce dernier cas d'ailleurs, la conjoncture pouvait être très sûrement prévue et conséquemment comprise par un déplacement du tracé, grâce à l'étude de la surface du sol. Il s'y présente, en effet, des dépressions que, depuis très longtemps, on désigne sous le nom de *vallées sans eau* et dans lesquelles on s'était imaginé que des ruisseaux avaient dû couler avant un assèchement de la surface. J'ai reconnu, par l'observation et par l'expérience, que ces accidents sont comme des reflets de la dénudation réalisée par l'eau souterraine à la surface du substratum imperméable des sables. Le ruisseau souterrain, c'est-à-dire le

niveau saturé mobile, érode l'argile qui le supporte et le sable superposé s'affaisse tout doucement au fur et à mesure des progrès de ce travail occulte. De sorte que, réciproquement, la vue des « vallons sans eau » permettait de prévoir les érosions de la surface des marnes infrasaibles et leur état saturé et coulant, en conséquence duquel il fallait à tout prix éviter de les recouper par le tunnel. Quand les compagnies de chemins de fer, et en général quand les ingénieurs tiendront la géologie en plus grande estime qu'ils ne font encore en bien des cas, ils éviteront beaucoup de déboires.

La circulation de l'eau souterraine se fait suivant les cas avec une rapidité très variable, et l'on peut, en dehors de toute mesure, rappeler des exemples qui montrent qu'un long trajet souterrain a été accompli en peu de temps.

C'est ainsi que les puits artésiens de l'Algérie rejettent fréquemment des animaux vivants, *Telphusa*, *Hemichromys* et autres qui n'ont pas pu vivre plus de quelques jours dans les régions souterraines.

On a recueilli des données importantes par l'emploi de substances facilement reconnaissables dans les points où s'alimente la nappe souterraine et qui ont réapparu aux lieux d'émergence en révélant la direction des cours cachés.

Parmi les évaluations relatives à l'allure des courants souterrains on peut rappeler celle qui concerne le temps mis par les pluies tombées à Louvain pour parvenir au puits artésien de la ville d'Aerchot, et d'après laquelle les eaux recueillies en ce moment dans cette ville seraient tombées sous forme de pluie vers le temps de Charles Quint¹.

La fontaine de Vaucluse peut être choisie comme une localité spécialement propre à fournir sur la circulation souterraine des données très précises. On y distingue nettement le mode d'alimentation par l'engouffrement des pluies au travers de roches fissurées et corrodées, la

1. Cogels et Van Ertborn ; *Bulletin de la Société malacologique de Belgique*, t. XXI, p. 20.

circulation de la nappe profonde et enfin le régime de l'émergence facilement accessible.

D'autres exemples de disparition et de réapparition d'eau pourraient être fructueusement examinés pour nous bien pénétrer de l'importance des circulations souterraines et de leur rapport avec les circulations superficielles et pour nous éclairer sur plusieurs circonstances qui amènent le retour à la surface des eaux souterraines. La plus simple concerne la forme extérieure du sol et par exemple la présence des gorges profondes venant recouper les niveaux d'eau. On citera à cet égard la localité classique de Pfeffers près de Ragatz, dans les Grisons où, sur la berge à pic de la Tamina, vient sourdre une source très appréciée des malades depuis fort longtemps, à cause de sa thermalité et dont la température est d'ailleurs en rapport très évident avec la profondeur des roches qui séparent son point d'émergence des sommets où elle s'alimente.

Dans d'autres cas les nappes souterraines reviennent vers le jour, en vertu d'une poussée ascensionnelle qui peut les faire jaillir d'une profondeur plus ou moins grande. Les exemples de sources jaillissantes naturelles sont très nombreux et l'on peut citer comme spécialement faciles à reconstituer dans leur mécanisme celles qui sourdent en Algérie. Les pluies qui tombent sur l'Atlas s'infiltrent en grande partie dans des couches perméables séparées de la surface par des roches étanches et constituent la *mer sous terre* des Arabes. A la faveur de pertuis convenables, ces eaux tendent à reprendre leur niveau et viennent s'épancher en gerbes plus ou moins volumineuses autour desquelles se sont établies des oasis.

On n'a vraiment eu qu'à imiter les sources jaillissantes naturelles dans l'établissement des puits artésiens, mais ce n'est cependant qu'après de longues périodes d'exploitation de ceux-ci qu'on est parvenu à élucider la théorie de leur mécanisme. Pendant longtemps en effet, et tant qu'on a méconnu l'état d'activité incessante des profon-

deurs du sol, on s'est plu à faire du phénomène artésien une application de l'hydrostatique et c'est ce dont témoigne la comparaison établie si longtemps entre les puits jaillissants et les « vases communiquants » des cabinets de physique. Comme Ch. Delaunay l'a bien fait sentir, ce rapprochement manque par la base et il faut faire intervenir l'état d'écoulement de la nappe souterraine qui alimente les veines ascendantes. Dès qu'on se transporte ainsi dans le domaine de l'hydrodynamique on voit les difficultés s'aplanir et les différences disparaître entre les prévisions du calcul et le résultat des observations, en ce qui concerne la hauteur des jets.

Les puits artésiens ont une importance considérable au point de vue de l'alimentation en eau des centres de population, villes et villages, fermes et usines et dans certaines régions ils sont multipliés à profusion. Ils peuvent donner outre le liquide qu'on leur demande, de la force motrice et de la chaleur. On leur reproche cependant de fournir des eaux impures et qui sont chargées de principes salins, témoignage de l'activité chimique que leur a communiquée la haute température relative des régions d'où elles proviennent.

Il semble que, dans quelques cas au moins, on pourrait perfectionner les qualités de leurs produits en même temps qu'on diminuerait les frais de leur exploitation, en arrêtant pour ainsi dire les nappes souterraines déjà contenues dans les lits perméables, avant qu'elles n'aient atteint les grandes profondeurs où les sondages vont les rechercher. Pour fixer les idées, on sait que les puits artésiens de Paris vont s'alimenter à 500 mètres de profondeur, dans des lits de sables albiens qui affleurent sur une grande partie du pourtour du bassin et par exemple dans la Haute-Marne et les départements voisins, l'Yonne et l'Aube. Ces sables, soutenus par des masses étanches, plongent avec les marnes du gault sous les assises crayeuses et tertiaires en conservant une pente générale vers l'Ouest qui

assure l'écoulement continu de l'eau d'imprégnation. Il est clair qu'avec des barrages convenablement disposés, on arrêterait les eaux au passage, après qu'elles auraient subi, de la part des sables, une filtration qui les aurait débarrassées des impuretés les plus grandes, ce qui les rendrait comparables à des eaux de source ; mais bien avant que leur séjour dans les profondeurs leur ait donné cette température élevée qui les rend impropres à la plupart des usages domestiques et qui leur donne une espèce d'activité chimique dissolvante à l'égard des roches, se traduisant par l'acquisition de cette salure qui les rend désagréables et les fait rejeter pour la boisson. Cette captation, qui se ferait au détriment d'eaux destinées à aller dans les profondeurs, ne lèserait pas les habitants de la surface ; les travaux de sondage seraient remplacés par des travaux de captage à la surface et d'irrigation : c'est une question à étudier, car l'application de cette idée pourrait amener un bénéfice des deux côtés¹.

La haute température relative et la minéralisation des eaux artésiennes sont riches en enseignement au sujet des eaux jaillissantes naturelles et nous préparent à reconnaître l'importance considérable du rôle qu'elles remplissent et qu'elles ont rempli à toutes les époques dans l'épaisseur de l'écorce terrestre.

On peut en effet leur rattacher logiquement des eaux chaudes sortant au jour à la faveur de failles qui sont comme de grands coups de sonde naturels et qui se présentent dans des pays dont la constitution n'est point volcanique. En comparant de nombreux gisements de cette catégorie, on arrive progressivement à reconnaître que les eaux thermales incrustent progressivement les fissures qui leur livrent passage et y déposent, à la suite de réactions plus ou moins complexes, et dans le détail desquelles

1. J'ai indiqué ce projet pour la première fois dans une Conférence d'actualité géologique que j'ai donnée au Muséum d'histoire naturelle le 5 mars 1899. Voyez la *Revue scientifique* du 22 avril 1899, 4^e série, t. II, p. 481.

Sénarmont nous a fait pénétrer, tout le cortège des minéraux filoniens — depuis les gangues, comme le quartz, la fluorine, la barytine et la calcite, jusqu'aux minerais les plus variés.

Il résulte de cette constatation, non seulement que la lumière la plus vive est projetée sur l'histoire d'une des catégories les plus importantes des gîtes métallifères, mais que nous avons le droit de conclure, de la disposition des filons dans tous les terrains, des notions quant à la circulation de l'eau souterraine aux diverses époques ; et tout le monde comprend à quel degré la physiologie de la Terre, en même temps que son anatomie, en sont perfectionnées.

Nous pouvons admettre aussi que la circulation souterraine des eaux engendre par double décomposition certains principes élastiques et avant tout l'acide carbonique. La connaissance est acquise en effet de fontes naturelles souterraines dont les blocs d'Ovifak nous représentent des échantillons ; au contact de l'eau elles doivent engendrer l'hydrogène carboné qui jaillit dans certains gisements naturels, avec ou sans bitume, et dont la combustion spontanée engendre l'acide carbonique.

Il reste à constater que les eaux ascendantes peuvent charrier autre chose que des principes dissous générateurs de filons. Elles entraînent aussi, par un procédé mécanique, des argiles, des sables et des fragments rocheux de tailles très diverses. La certitude à cet égard a tout d'abord été procurée par l'examen des puits artésiens spécialement favorables à une étude précise. Il a montré par exemple que le puits de Grenelle et que le puits de Passy apportent au jour, de 540 mètres de profondeur, des quantités très notables du sable vert dont est constituée la couche aquifère albienne d'où ils proviennent. Ce qui se fait dans ces véritables coups d'épingles que représentent les sondages artésiens, s'est nécessairement accompli sur une échelle bien plus grande dans l'épaisseur de certaines failles ou de

certaines perforations verticales qui sont comme des sondages naturels.

En 1861 et en 1862, Hervé Mangon a constaté que chaque secousse sismique ressentie dans l'Europe occidentale s'est traduite par une augmentation (de 62 grammes à 147 grammes par litre) dans la proportion des sables entraînés au jour par les eaux artésiennes de Passy.

Lors du tremblement de terre de Charleston, aux États-Unis, le 31 août 1886, on a constaté la sortie par les fissures du sol de sables micacés, tout à fait analogues à ceux qui constituent de vrais dykes au travers des schistes crétacés de Californie. Ces faits se rattachent au grand phénomène de *l'alluvionnement vertical* que j'ai étudié depuis très longtemps¹.

Une attention très spéciale doit être accordée au travail de dénudation que l'eau souterraine fait très fréquemment éprouver aux roches au contact desquelles elle circule. On a tout d'abord une preuve certaine de l'activité de ce phénomène par la composition de certaines eaux émergeant à la surface, qui sont riches en principes minéraux émanant des profondeurs.

C'est par exemple le cas pour des eaux renfermant du carbonate de chaux et l'on sait que c'est ce qui se présente pour toutes les sources fournies par les pays calcaires. Pour citer un nom très connu à cet égard, il suffit de rappeler les incrustations auxquelles donnent lieu dans leurs conduites les eaux captées à Arcueil, à la porte même de Paris. Ces eaux, fournies par une nappe très peu profonde, dont la température n'est même pas tout à fait constante et qui par conséquent n'ont aucun lien avec les eaux thermales, extraient chaque année du sol un volume très notable de calcaire, et l'on conçoit qu'il soit bien facile de rencontrer des multitudes d'exemples d'une activité bien plus grande.

1. *Mémoire sur les Alluvions verticales* Bull. Soc. imp. de Naturalistes de Moscou, 1876.

Rapidement, on arrive à des eaux qui, sans émettre visiblement de l'acide carbonique, sont incrustantes. Il y en a par exemple de semblables dans le bas du Val-Fleury à Meudon (Seine-et-Oise) et les points de sortie de griffons très peu volumineux sont entourés de larges zones d'un véritable travertin dans la masse duquel sont empâtés des végétaux et des débris de mollusques terrestres et d'autres animaux.

De même, les eaux qui circulent au contact des bancs de gypse ou pierre à plâtre, arrivent au jour, séléniteuses comme on dit, dures, impropres au savonnage et à la cuisson des légumes, donnant dans les chaudières à vapeur des dépôts parfois fort nuisibles. Quand elles peuvent s'évaporer sur le sol ou dans les fissures qui le traversent, elles y déposent des concrétions de gypse dont la signification est parfois d'autant plus nette qu'elles sont, comme à Argenteuil, au contact immédiat de bancs de pierre à plâtre corrodées et même disséquées par les eaux.

La dénudation souterraine peut d'ailleurs prendre deux formes très distinctes selon les circonstances, et surtout selon la cohérence et les autres caractères physiques des roches soumises aux entreprises de l'eau d'infiltration. Si la roche est friable et ébouleuse, elle tend à combler les vides qui se produisent par des tassements progressifs : il peut en résulter des contre-coups jusqu'à la surface du sol qui s'affaisse lentement ou brusquement suivant les cas.

Si au contraire la roche est très cohérente, la circulation de l'eau profonde peut y ouvrir des canaux de toutes les dimensions, verticaux, horizontaux et obliques, formant parfois tout un réseau de vaisseaux, déterminé avant tout par celui préexistant des cassures et des diastromes. C'est ainsi que se présentent, spécialement dans les pays calcaires, les puits naturels et les cavernes où circulent d'habitude non seulement des eaux, mais encore des gaz, air atmosphérique, acide carbonique ou autres.

De semblables cavités jouent évidemment dans l'éco-

nomie générale du globe des fonctions extrêmement variées et l'on doit aussi y voir un détail des plus caractéristiques du régime continental dévolu au terrain superposé. Aussi doit-on s'attacher à rechercher des traces de puits naturels ou de cavernes fossiles, c'est-à-dire ouvertes à des époques séparées de l'époque actuelle par des submersions sous-marines de la région. Et si jusqu'ici on n'en a guère rencontré, cela doit provenir de la facilité avec laquelle de semblables accidents, malgré leur dimension, peuvent ensuite s'effacer. Si l'on s'imagine une région caverneuse, comme sont actuellement nos Causses, affaissée et envahie par la mer, on conçoit que la pénétration souterraine des eaux y provoque progressivement le remplissage de tous les vides par apport de matières ou par effondrement des parois. Une coupe ouverte bien plus tard dans le massif, donnera des brouillages analogues à ceux que nous rencontrons bien souvent dans les coupes géologiques et qui ne sont pas d'ordinaire d'interprétation bien facile. Peut-être un jour saura-t-on mieux les lire et en tirer des notions profitables à plus d'un titre.

Mais on n'aurait qu'une idée incomplète de la fonction de la nappe profonde si l'on n'y voyait qu'un agent de dénudation. Il est des cas où elle est l'artisan d'une véritable sédimentation. Par exemple, l'eau qui a rapporté au jour les montagnes de travertin que nous citions tout à l'heure a laissé dans la profondeur les matières contenues dans les roches qu'elles dissolvaient et qui résistaient à son action. Ces résidus se sont constitués à l'état d'une formation nouvelle qui peut prendre les apparences d'une vraie sédimentation. Il suffit ici de mentionner un fait qui va prendre une importance considérable, quand nous pourrons l'étudier en détail, c'est-à-dire par les vestiges qu'il a laissés dans les terrains antérieurs au temps actuel.

La température des eaux souterraines varie avec leur profondeur et les puits artésiens nous ont procuré à cet égard des renseignements très précieux par leur précision

et qui montrent que, malgré son état de mouvement, l'eau se met en équilibre thermique avec la couche qui la contient.

L'activité chimique de l'eau variant avec sa température, il n'est pas contestable qu'à une profondeur donnée et qui est extrêmement faible par rapport aux dimensions de la Terre, elle acquiert la propriété de provoquer des combinaisons toutes différentes de celles qui composent la grande masse des sédiments marins et de réaliser des réactions comparables à celles qui se produisent dans les tubes de Sénarmont.

Aussi est-ce dans des faits de ce genre qu'il faut chercher l'explication de tous les phénomènes chimiques du *métamorphisme général*.

En résumé, la nappe d'eau souterraine constitue un mécanisme remarquablement bien défini dans la physiologie tellurique. Elle préside à de très grandes fonctions et contribue dans une large mesure et avec une activité intense, au maintien de l'équilibre mobile dont les études géologiques nous donnent de plus en plus le spectacle dans toutes les parties de l'écorce terrestre.

4 — LA NAPPE D'EAU SUPERFICIELLE

L'histoire de la nappe d'eau superficielle, malgré l'opinion qu'on avait de la bien connaître depuis longtemps, s'est cependant renouvelée dans ces dernières années, au point d'avoir pris une allure tout à fait imprévue. On va reconnaître que cette nappe doit à son tour être considérée comme constituant un organe de la plus haute signification dans l'économie de la Terre. Liée à chaque instant et de façons diverses à la nappe souterraine, elle conserve cependant son autonomie et donne lieu à des produits qui ne peuvent être confondus avec aucun autre.

On peut la définir en disant qu'elle est formée du pro-

duit de la pluie, circulant à la surface du sol et imprégnant la pellicule la plus superficielle qui est d'ailleurs son œuvre et qui forme comme l'épiderme des régions soumises au régime dit continental.

Il faut bien insister sur ce dernier point qui nous vaut un moyen très précis et en même temps très fécond de séparer de toute autre chose la nappe que nous avons en vue. L'eau de pluie ruisselant sur le sol et constituant l'eau sauvage pénètre plus ou moins dans son substratum sans perdre son allure essentielle qui est de suivre la déclivité du terrain. Une autre partie entre plus avant dans les assises perméables, mais elle nous échappe alors et nous l'avons considérée dans le chapitre précédent. Celle dont il s'agit ici mouille la terre végétale, le *sous-sol* aussi des agronomes et les lambeaux de terrains détritiques, limons, sables, graviers qui, comme nous venons de le rappeler, représentent les produits de l'attaque du sol ancien par l'intempérisme.

Il importe aussi de bien remarquer que l'épaisseur de la nappe d'eau superficielle varie surtout d'après la forme du terrain, c'est-à-dire d'après sa pente générale et aussi d'après les irrégularités de son substratum. Une variation analogue concerne la vitesse d'écoulement de la nappe, qui s'écoule vite dans les régions inclinées et qui tend à se ralentir, même parfois à devenir stationnaire dans les points bas où par conséquent elle s'accumule et prend une puissance proportionnée. De façon que, tandis que sur les pentes la terre végétale ou les matériaux meubles sont simplement imprégnés d'une petite quantité d'eau, variable d'ailleurs avec l'état météorologique et pouvant descendre jusqu'à zéro pendant les grandes sécheresses, — les régions basses, telles que le fond des vallées, sont absolument saturées et même plus que saturée, de façon qu'un excès de liquide se fraye un passage au contact des éléments qui refusent de le retenir et apparaît sous la forme de *cours d'eau*. Je répète qu'on n'arrive à bien comprendre la

mécanique des rivières, et par conséquent leur fonction géologique, qu'en les faisant ainsi descendre à la qualité de simple région singulière dans l'ensemble de la nappe d'eau superficielle. C'est par une véritable aberration, dérivant d'une étude mal conduite des phénomènes, que celle-ci a été souvent qualifiée de « nappe adjacente aux rivières ». En réalité c'est la rivière qui est adjacente à la nappe et en constitue la simple décharge.

Une fois à ce point de vue, on se fait de l'intempérisme engénéral une opinion extrêmement simple et satisfaisante.

A part des collaborations secondaires qui proviennent de la nappe profonde, par exemple lors des réapparitions des cours souterrains, l'alimentation de la nappe superficielle se rattache presque exclusivement à la pluie. Les petits filets d'eau convergent vers les points bas et se réunissent dans les dépressions pour s'écouler pardessus celle de leurs parois qui se trouve convenablement disposée. Au fond des ravins il y a d'habitude une sorte de cul-de-sac qui réunit les conditions favorables et c'est là ce qui d'ordinaire est qualifié de *source* ou cours d'eau. Ce n'est cependant qu'un point parmi tous ceux qui constituent une surface continue sur toute l'étendue du bassin hydrologique, et, conformément à notre définition de tout à l'heure, on reconnaît que la source du cours d'eau existe tout le long de ses rives. Le point d'aval, traité à part, à cause de sa situation et de son apparence ne jouit d'aucune propriété spéciale et le bruit qu'on a fait naguère à propos de la capture des cours d'eau consacre les illusions dans lesquelles on vivait à l'occasion des rivières. En effet, dans les études plus ou moins rationnelles qu'on leur a consacrées, on les a étudiées surtout comme des lignes tendant vers une forme d'équilibre, et l'on a méconnu qu'elles sont en réalité l'élément visible, par suite de circonstances spéciales, de toute une surface. Cela est si vrai que le lit même du cours d'eau est partout, et en même temps, pourvu des caractères de la

source: certaines gouttes de pluie tombent directement du nuage dans la rivière.

La rivière, comme la nappe superficielle dont elle est simplement le filet visible au jour, n'est pas exclusivement alimentée par l'eau d'infiltration dérivant directement de la pluie. Dans une infinité de circonstances, le flanc des coteaux recoupe des affleurements communs de roches perméables et de roches imperméables qui les recouvrent, de sorte que des niveaux aquifères profonds viennent se déverser dans le sol, et c'est ce que la figure 4 est destinée à montrer.

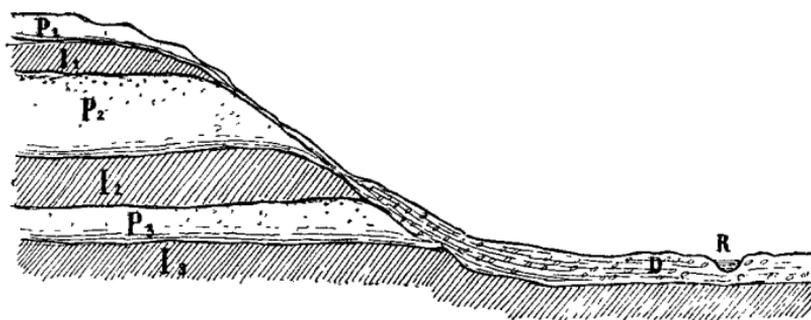


FIG 4 — Allure générale de la nappe aqueuse superficielle soutenue dans la première couche terrestre perméable P_1 (terre végétale ou autre) par la première couche imperméable I_1 . Elle imprègne les alluvions D du fond de la vallée et apparaît au jour dans la rivière R . Les nappes souterraines soutenues par les assises imperméables I_2 , I_3 , etc., lui fournissent leur collaboration.

Une fois posées les prémisses précédentes, il suffit d'ouvrir les yeux pour assister véritablement à tous les incidents de la sculpture du sol, à tous les progrès du creusement des vallées. Sous toutes ses formes de pluie, de gel, de vent, etc., l'intempérisme s'emploie sans relâche à adoucir les formes des roches : les pointes, les angles sont remplacés progressivement par des surfaces douces et des arêtes émoussées. De son côté le ruissellement des eaux débarasse les pentes hautes des matériaux mobiles et les entraîne peu à peu dans les parties basses. Les particules les plus fines sont emportées les premières et les autres sont

relativement lavées, mais celles-ci aussi, perdant successivement leurs supports, glissent ou roulent et en fin de compte arrivent au bas des pentes. A chaque inclinaison du terrain correspond l'arrêt provisoire d'une catégorie donnée de ces fragments errants et les régions voisines du thalweg de la vallée sont le rendez-vous de bien des débris, d'ailleurs arrondis par le voyage qu'ils ont dû faire pour y parvenir.

La pluie réalise au propre la *dissection* de la surface du sol et fait intervenir à cet effet, à côté de son énergie mécanique, le pouvoir chimique dont elle jouit aussi bien par l'eau elle-même que par les corps quelle tient en dissolution, comme l'acide carbonique, vis-à-vis de beaucoup de substances minérales. A ce titre, elle doit être comptée au nombre des agents les plus efficaces de production et de renouvellement incessant de la terre végétale, qui peut subsister au moins en apparence, avec une persistance complète de caractères, sans mettre obstacle à l'évolution qui se poursuit sous elle de l'évolution morphologique de son substratum.

Les actions que nous venons de rappeler rendent compte, d'une façon complète et sans chercher plus loin, des deux faits si dominateurs de l'origine et de l'évolution du modelé de la surface du sol, et de l'extension sur tous les terrains d'une sorte d'épiderme de résidus désagrégés des roches passant par mélange de détritiques organiques à l'état de terre végétale.

C'est comme un détail qu'il faut noter le remaniement incessant de ces matériaux étalés par le passage de nouvelles eaux en chaque point ; mais ce détail prend une importance tout à fait considérable à cause des fausses interprétations qu'on en a commises et des conséquences qu'on a voulu tirer de son étude incomplète, pour l'histoire même des vallées sur laquelle nous aurons à revenir plus loin.

Les anciens auteurs sont portés à regarder la nappe d'imprégnation des terrains de transport comme une sorte

d'extravasement de la rivière. C'est le point de vue développé par Daubrée (Eaux souterraines, I, ch. 2). Mais il est aisé de montrer au contraire que c'est la rivière qui représente pour ainsi dire le trop-plein de la nappe. Elle n'apparaît sous forme de rivière qu'en raison de son action dégradante, qui la conduit à entraîner les matériaux meubles au milieu desquels elle a dû commencer par couler.

L'explication de l'allure des méandres d'une rivière qui travaille le fond de sa vallée, m'a paru devoir s'éclaircir par la comparaison avec une corde agitée transversalement et donnant le spectacle d'une sorte d'écoulement de ses inflexions¹. Ce rapprochement a cependant été discuté et sa légitimité a été mise en doute. Il paraît cependant facile de le fortifier.

Il y a des points où le cours d'eau promène sur la roche sous-jacente le cortège des graviers qui tapissent son lit. Dans ce cas, même pour des rivières relativement très tranquilles comme la Seine, les roches en places sont polies et cannelées. J'en ai recueilli par exemple de très bons exemplaires au Kremlin où le calcaire grossier recouvert par le diluvium présente les caractères dont il s'agit. M. A. Dollot en a pris pour moi d'excellentes photographies.

C'est une transition toute naturelle vers l'examen du travail vertical réalisé par des rivières très rapides et qui sont empêchées par des obstacles latéraux à se livrer à la divagation de méandres. Il se produit dans ce cas des gorges ou canions, qui méritent de nous arrêter un moment.

Bien des personnes n'ont pas vu clair dans l'histoire de ces accidents et par exemple on a pensé parfois que la rivière ne devait pas suffire à les expliquer et qu'il fallait lui supposer la collaboration d'un soulèvement progressif du sol. C'est par exemple l'avis émis en 1869 par le général Bourdon dans sa *Topographie du petit Atlas algérien*. « Il

1. Voir ma *Géologie expérimentale*, p. 77 et suiv.

est probable, dit-il, que la chaîne s'est soulevée lentement sous le lit déjà fait des cours d'eau... Les montagnes grandissaient de chaque côté et les thalwegs conservaient sensiblement le même niveau. C'est l'action de la poutre poussée par un mécanisme sous la scie qui la fend en montant des deux côtés de la lame. »

En 1875, Dutton étudiant la géologie des grands canions du Colorado a émis un avis analogue et un pareil concert pourrait disposer à adopter l'opinion en question.

Toutefois il suffit d'une étude comparative de localités bien choisies pour reconnaître qu'il y a une erreur complète dans cette interprétation et que si l'on tient à comparer la section du sol par la rivière à celle d'une poutre par la scie, il faut considérer les machines où c'est la scie qui descend dans le bois au lieu de celles où c'est le bois qui monte des deux côtés de la lame.

Une petite excursion dans les Alpes suffirait à nous procurer un grand nombre de localités typiques dont la comparaison serait tout à fait démonstrative. Si nous supposons par exemple les trois localités du Staubach (près d'Interlaken), de Muhlbach qui descend du Brienzler Grat sur la rive gauche du lac de Brienz et du Trient (près de Vernayaz) ramenés au voisinage l'une de l'autre, établies sur un même escarpement rocheux, nous serions frappés des liens intimes qui en font comme trois termes dans une même évolution (fig. 5). Avec la chute du Staubach A nous avons le commencement du phénomène : nous voyons un cours d'eau très rapide, charriant beaucoup de sable et de galets et devant lequel le sol manque tout à coup. Il déverse les matériaux qu'il charriait sous la forme d'un cône de déjection T et son eau se pulvérise dans la traversée des 300 mètres d'air qui le séparent du fond de la vallée de la Lutschine. Déjà on voit très nettement l'œuvre des pierailles de toutes grosseurs charriée par l'eau torrentielle à la surface du sol calcaire : celui-ci est scié littéralement et on ne peut s'empêcher de trouver dans la disposition

de ces choses naturelles, le torrent, les pierrailles et la masse calcaire, une identité avec la disposition des choses artificielles qui constituent l'atelier en travail du lapidaire

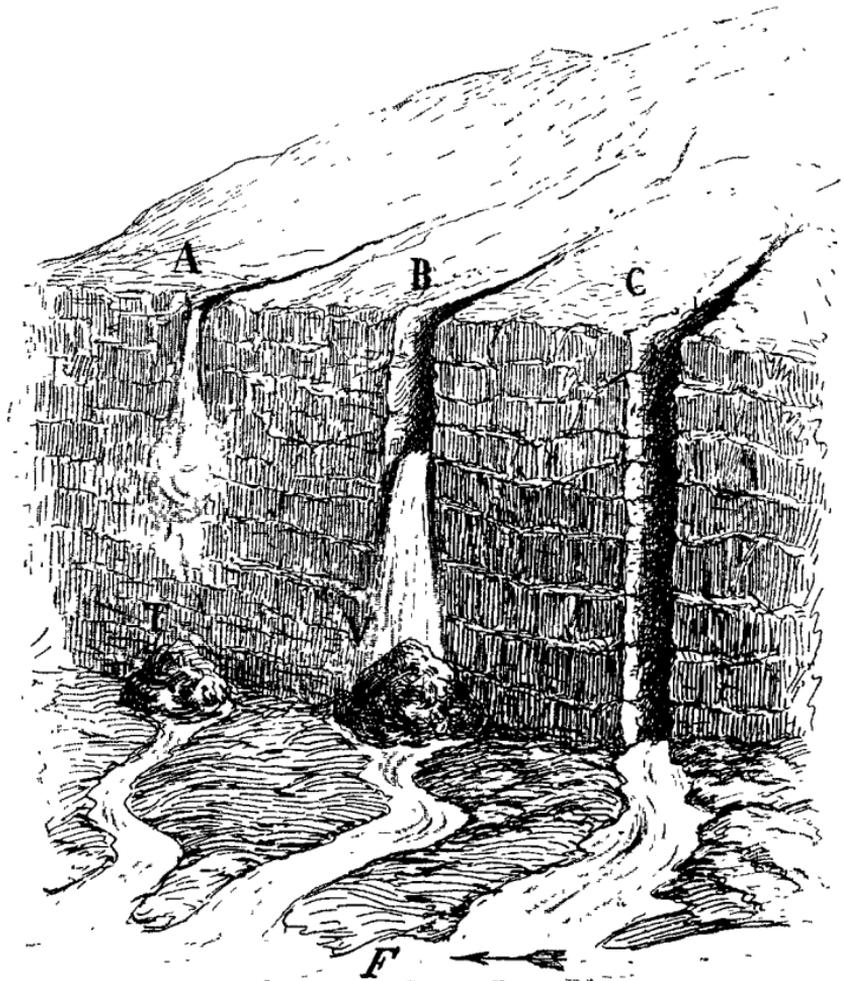


FIG 5 — Schéma montrant le progrès du sciage du sol par les cours d'eau à allure torrentielle. A, cas du Staubach, où la section est à peine commencée ; T, cône de déjection B, cas du Mulhbach, où la section est bien plus avancée, V, cône de déjection C, cas du Trient, où la section est terminée. F, fleuve où se jettent les torrents.

(fig. 6). Le fil de métal mou ou même de fibre végétale sans plus de dureté que l'eau, la poussière d'émeri que le fil entraîne et le bloc de pierre qui se coupe en deux

sous l'influence du passage de l'émeri entraîné par le fil. Sans compter que cet émeri vient se collecter sous l'établi avec la poussière de la pierre travaillée en un vrai cône de déjection comme les pierrailles au pied de l'escarpement naturel.

A la cascade de Muhlbach (B, fig. 5), on voit l'outil d'usure qui a pénétré la paroi rocheuse sur plus d'un tiers de sa hauteur verticale. Le cône de débris est encore là plus volumineux, mais modifié dans sa forme par le choc de l'eau qui n'était plus pulvérisée à cause de la hauteur moins haute tombée sur lui en grande quantité.

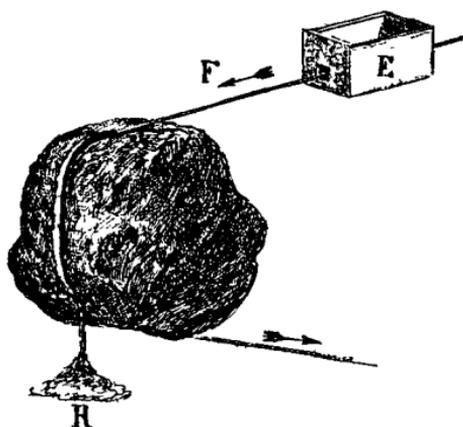


FIG. 6 — Principe de la machine à scier les pierres F, fil sans fin qui passe sur le bloc et qu'on peut comparer au filet d'eau du torrent E, réservoir contenant l'émeri entraîné par le fil comme les pierrailles sont entraînées par le torrent. R, tas d'émeri et de poussière de roche représentant le cône de déjection.

Enfin dans les gorges du Trient, C, la section est complète et le cône de déjection a été balayé par l'eau courante qui l'a emporté dans le Rhône tout voisin, représenté par le fleuve F où il s'est mélangé aux sédiments ordinaires. Les parois montrent avec une netteté complète les étapes successives dans les progrès du sciage vertical.

On reconnaît que toutes les parties de la roche n'ont pas opposé au travail les mêmes résistances : certaines places moins dures ont même permis une esquisse de méandres et alors il reste au-dessous comme des corniches qui sont

des portions du fond du lit à divers moments. Ils offrent souvent des « marmites de géants » dont la vue suffit pour confondre cette idée absolument inadmissible que la gorge a toujours eu sa profondeur actuelle et qu'à un moment donné l'eau la remplissait — opinion qui, pour imprévue qu'elle soit, n'en a cependant pas moins été défendue par plus d'un auteur.

C'est au même ordre de phénomènes qu'il faut rattacher les faits curieux de régression des cascades, si nettement démontrés par le Niagara et qu'on retrouve partout, et c'est l'occasion de répéter que si la dénudation fluviale est essentiellement transgressive dans son travail en surface, ce qui se traduit par la descente progressive de ses méandres, — au contraire cette dénudation est essentiellement régressive dans tout son travail en profondeur. Et c'est ainsi que la « capture des rivières », dont on a fait tant de bruit, est une condition inévitable du déplacement des cours de matière mobile réalisant une fonction dénudatrice, si bien que nous la retrouverons chez les glaciers comme chez les fleuves. La régression des torrents joue un rôle extrêmement considérable dans la dénudation du sol et intervient d'une façon décisive dans la production des *cots* qui séparent les cimes montagneuses.

L'histoire de la nappe superficielle comprend une foule de chapitres distincts parmi lesquels il faut faire une place à part à la désagrégation progressive de l'épiderme rocheux, grâce à la collaboration d'une série de petites actions, qui rentrent dans la grande formule de l'intempérisme.

Les résultats en sont très variés suivant diverses circonstances et tout d'abord suivant la forme extérieure du sol. Dans les pays horizontaux, ou dans ceux dont les pentes ne sont pas trop accentuées il en résulte la terre végétale.

Il est même alors des circonstances où l'on constate des liens imprévus entre ce mince épiderme du globe et les

masses sous jacentes qui lui ont donné naissance. C'est ce qui arrive entre autre quand ce sol sous-jacent est de nature crayeuse, c'est-à-dire formée de carbonate de chaux, allié à une proportion variable d'argile et renfermant des rognons siliceux.

L'eau superficielle réalise alors une véritable dissection de la roche et en extrait le carbonate de chaux en même temps qu'elle peroxyde le fer contenu dans le résidu insoluble. Aussi, celui-ci constitue-t-il un revêtement d'argile ocreuse remplie de nodules siliceux parmi lesquels se montrent parfois des fossiles silicifiés et spécialement des oursins. Il n'y a aucun doute que ce soit là l'origine normale de l'argile à silex si développée autour de Paris, par exemple dans Seine-et-Oise, dans Seine-et-Marne, dans l'Oise, dans l'Eure, etc., et dont le mode de formation a jadis tant exercé l'imagination des géologues.

Une conséquence de ces faits, importante pour la suite de nos études, c'est que l'argile à silex ne répond pas à un âge géologique déterminé : elle continue à se former pendant tout le temps que des masses crayeuses exondées sont accessibles à l'infiltration des eaux météoriques. Il y ena de toutes sortes d'époques, et il a pu arriver bien des fois qu'un affaissement ayant permis le recouvrement de ce terrain résiduel par des sédiments plus récents, il ait pris l'apparence d'une production littorale, d'autant plus qu'il repose sur un substratum corrodé rappelant un rivage battu par les flots. Par exemple sur la falaise de Dieppe, près de Pourville, l'argile à silex est recouverte par les lignites de l'âge du soissonnais.

On remarquera en même temps, au point de vue de l'histoire de la terre végétale, combien, même quand elle se fait sur place aux dépens d'une masse sous-jacente, elle peut différer de celle-ci jusqu'à contraster absolument avec elle. Voici une roche calcaire qui donne une terre argileuse et qu'on devra amender en relevant la craie de la profondeur ; ailleurs on trouvera des sous-sols calcaires donnant

des terres avant tout sableuses. Ces faits éclairent certainement l'histoire des terres rouges qui recouvrent partiellement les plateaux calcaires entre Nîmes et la vallée du Gardon et sur lesquelles Émilien Dumas a fait des suppositions si inacceptables.

On peut en rencontrer dans certains points du département de la Marne et par exemple aux alentours du mont Aimé, qui sont dans ce cas. La roche en place consiste en un calcaire crétacé très supérieur, du niveau qualifié de danien par d'Orbigny et qui est très pur relativement. Il contient cependant, avec de faibles proportions d'argile, des grains de quartz peu abondants et tout à fait remarquables par leur limpidité, qui en fait de vrais débris de cristal de roche. Ces grains se retrouvent à la surface de la formation décapée par la dénudation pluviale et ce sont eux qui, pour une bonne part, constituent ces sables incomparables qu'on exploite pour les verreries à Dormans et à Rilly et dont les caractères avaient conduit M. Hébert à leur supposer une origine chimique tout à fait singulière.

Le calcaire grossier nous fournit des remarques analogues. Dans une bonne partie de son épaisseur, spécialement dans ses régions supérieures, il est chargé de sable quartzeux qu'on isole en quantité très notable par dissolution de la roche. Certainement ce sable, isolé par l'attaque météorique, contribue à donner ses qualités aux terres des régions dont le calcaire grossier forme le sous-sol.

A de certaines formes du relief du sol, associées à de certaines constitutions géologiques correspond la manifestation du phénomène connu sous le nom d'épanchement boueux. Il prend souvent l'allure d'un cataclysme, amenant la ruine des habitations ou des cultures qui sont sur son passage, mais on ne peut douter qu'il ne soit essentiellement physiologique des pays montagneux. C'est l'un des procédés normaux par lesquels les substances constitutives des sommets gagnent les points bas.

Ces épanchements ont en outre le très vif et très sérieux intérêt de déterminer des effets qui bien souvent ont été mal compris et attribués à des causes toutes différentes. Leur étude montre que la boue, contenant une quantité déterminée d'eau, jouit d'une fluidité grâce à laquelle elle se meut sur les pentes avec une rapidité que détermine avant tout leur inclinaison. A la rencontre de la surface relativement horizontale de la vallée inférieure, l'épanchement s'étale en formant une espèce de delta dans lequel les sections ne révèlent aucune structure régulière : les matériaux les plus divers, depuis les particules les plus fines jusqu'aux plus gros cailloux y sont mélangés sans aucun ordre.

Comme les épanchements ont la plus grande tendance à se renouveler aux mêmes lieux à cause de la persistance des conditions favorables à leur production, le delta se compose d'ordinaire des produits d'apports successifs. Et, comme dans l'intervalle de deux coulées, les pluies ont lavé le delta déjà édifié et ont isolé à sa surface un lit de matériaux plus grossiers que ceux qui ont été entraînés, il est ordinaire qu'une section verticale plus tard ouverte montre une apparence de stratification simulée par les sections grossièrement parallèles et parfois très rapprochées de ces niveaux de lavage.

La boue qui s'écoule n'exerce aucune dénudation aux dépens des roches qui la supportent et lui servent de lit. Au contraire, et c'est ce que des expériences directes m'ont montré, les inégalités préexistantes du sol sont avant tout comblées et l'épanchement se construit une vraie rigole boueuse dans laquelle il glisse presque sans résistance.

Enfin, la boue a la propriété de porter sur son dos ou dans sa masse, des blocs rocheux qui peuvent être très volumineux et très lourds et qui franchissent parfois des distances très considérables sans supporter le moindre frottement et conséquemment sans perdre leurs formes anguleuses et leurs surfaces rudes.

Qu'on les suppose plus tard débarrassés par l'intempé-

risme de la boue qui a présidé à leur déplacement et ils auront sans exception tous les caractères des « blocs erratiques », c'est-à-dire des masses charriées sur le dos des glaciers. Leur rencontre a porté bien des auteurs à supposer l'ancienne extension des glaciers dans des points où ces phénomènes ne sont point intervenus. Et c'est ce qui me faisait dire tout à l'heure que l'étude des épanchements boueux a beaucoup plus d'importance qu'on ne le croirait à première vue.

L'étude des phénomènes dont il vient d'être question en révèlent d'autres qu'il est également indispensable de mentionner, parce que leur étude éclaircit des problèmes qui ont été mal posés. Par exemple, elle vient démontrer, et tout le monde sera frappé de l'ampleur exceptionnelle de cette conséquence, qu'on s'est totalement trompé dans une foule de cas dans la détermination du faciès soi-disant glaciaire d'une série de localités où des glaciers n'ont jamais existé ou, du moins, ils n'ont laissé aucun vestige de leur existence passée.

Par exemple, dans toute la région des Préalpes, on prétend reconnaître le terrain glaciaire dans des placages boueux sans stratification distincte et pleins de galets dont la surface est polie et striée comme le montre bien la fig. 7. Ce dernier caractère surtout semble décisif et l'on répète l'aphorisme d'Agassiz, qu'il suffit de trouver une seule strie sur un galet pour qu'on soit en droit d'affirmer que ce galet est glaciaire.

Or, les très longues études auxquelles j'ai soumis la question et qui sont à la fois des observations et des expériences m'ont démontré que l'origine de ces terrains est absolument différente de celle qu'on avait supposée. Les placages à galets sont des épanchements boueux identiques à ceux que nous décrivions il n'y a qu'un moment et qui nous montraient déjà qu'ils peuvent éparpiller des fragments rocheux faciles à confondre avec les blocs erratiques d'origine glaciaire.

Une fois constitués, ils ont été soumis à l'action des eaux superficielles et il est facile de montrer que c'est exclusi-



Fig. 7. — Galet strié des placages boueux des Préalpes vaudoises.

vement à celle-ci que les blocs empâtés doivent les caractères extérieurs auxquels tout le monde s'est trompé. La boue qui les réunit entre eux est composée d'argile calca-

rière mélangée de petits grains de quartz, dont la plupart sont extrêmement fins, mais parmi lesquels il y en a de plus gros. L'eau qui s'infiltré dans la masse à la suite des pluies

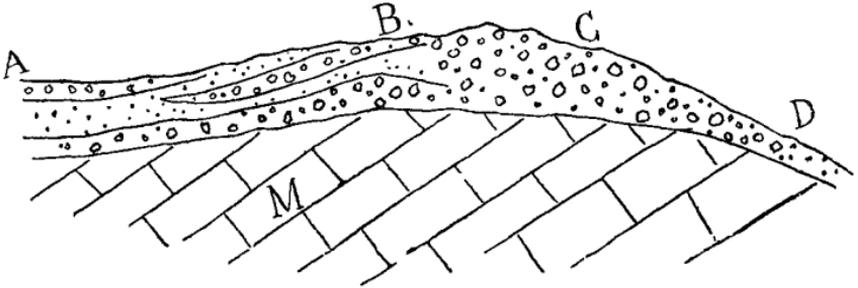


FIG. 8. — Coupe du flanc du ravin de Brent

ne manque pas de dissoudre le calcaire pulvérulent mélangé à l'argile et c'est pour cela que tous les griffons sourciers qui sortent de tous côtés sur les pentes sont essentiellement pétrifiants ; partout ils accumulent des tufs qui empâtent les herbes et les divers objets déposés sur le sol. La masse soustraite de ce calcaire laisse naturellement sa place vide dans l'épaisseur du placage boueux et, pour la combler, le terrain subit sans cesse de petits tassements surtout sensibles dans les régions en pente. C'est pendant ces déplacements que la surface des galets calcaires prend des caractères spéciaux.

D'abord la boue arénifère qui les enveloppe se comporte vis-à-vis de ce déplacement lent comme la « potée d'étain » des marbriers : elle les arrondit, en abat tous les angles et les polit ; en second lieu, les grains quartzeux un peu gros rayent la roche tendre et y laissent ces stries à la vue desquelles on a cru reconnaître l'influence d'un glacier.

La figure 8 ci-jointe relevée sur la rive gauche de la baie de Clarens, auprès de Brent (canton de Vaud) montre la liaison qui existe entre la présence des polissés et des stries sur les galets calcaires et la pente du substratum des placages boueux. Dans toute la partie A B où le sous-sol est sensiblement horizontal et où par conséquent

la dénudation souterraine ne peut produire que de très faibles glissements, les blocs calcaires sont restés anguleux, rugueux et dépourvus de stries. De C en D, au contraire, la matière argileuse conjonctive a disparu en très grande partie, et les blocs calcaires se sont arrondis, polis et striés. Cette seule observation que l'on peut vérifier sur place, suffit pour montrer l'inexactitude de la supposition glaciaire et pour justifier l'interprétation qui vient d'être résumée.

Les preuves à l'appui de cette interprétation sont du reste sans nombre et, avant tout, le raisonnement doit montrer que si les blocs avaient réellement été burinés par les glaciers de l'époque quaternaire, il y a bien longtemps que les eaux circulant dans la masse auraient fait disparaître et les stries et le poli des surfaces. Car, je le répète, la boue conjonctive est bien loin d'être imperméable et ceux qui l'ont jugée telle ne l'ont jamais regardée. C'est au contraire un terrain dans lequel l'eau circule avec une grande facilité. D'un autre côté je suis arrivé par des expériences de laboratoire à reproduire dans tous leurs détails les phénomènes de striage par dénudation souterraine. On peut trouver à cet égard quelques détails dans ma *Géologie expérimentale*, mais depuis la publication de cet ouvrage j'ai considérablement perfectionné le mode opératoire et les résultats sont incomparablement meilleurs.

La circulation des eaux souterraines dans les pores de certaines roches perméables amène souvent la concentration en divers points de matières préalablement mélangées uniformément dans toute la masse. Nous en avons un exemple très précieux dans l'économie de limons très récents connus couramment sous le nom de loess et dont il y a des spécimens dans toutes les régions. Ces roches dont la formation qui se continue actuellement se rattache pour une part à la sédimentation éolienne ou atmosphérique, résulte du mélange en proportions sensiblement égales de fines particules provenant des origines les plus

diverses et par conséquent présentant des compositions chimiques tout à fait différentes : le quartz, le calcaire et l'argile qui est le produit de l'altération de tous les minéraux silicatés, dont aucun en grains suffisamment fins ne peut résulter indéfiniment à l'action de l'intempérisme. Dans le mélange ainsi constitué, l'eau d'infiltration tend tout de suite à réaliser des triages et elle s'attaque surtout, par le moyen de l'acide carbonique qu'elle tient de l'atmosphère, au carbonate calcique; elle l'arrache aux portions qu'elle mouille d'abord et elle l'entraîne avec elle dans les zones de plus en plus profondes où elle pénètre peu à peu. De sorte que les portions superficielles se décalcifient, et l'on verra dans un moment le rôle physiologique exceptionnellement vaste de la décalcification.

Mais, le transport de haut en bas ne dure pas indéfiniment et c'est un fait d'observation qu'à une certaine profondeur, le bicarbonate de chaux tend à se défaire : l'acide carbonique qui l'avait véhiculé jusque-là l'abandonne et le calcaire rendu à son insolubilité dans l'eau reprend son état solide, mais contracte une structure concrétionnée toute différente de sa ténuité farineuse du début. En s'isolant ainsi il cimente entre elle les particules de loess du voisinage et peu à peu il se fait des « *concrétions* », des « *rognons* » dont le mode de formation sous nos yeux jette la lumière la plus vive sur l'histoire d'une foule de productions analogues enfouies dans les couches de tous les âges.

La solubilité du calcaire dans l'eau chargée d'acide carbonique, le rend remarquablement et rapidement mobile, de sorte qu'il change à chaque instant de place, non seulement pour sortir d'une couche, ce qui ne nous intéresse plus, mais pour se déposer autrement dans l'épaisseur d'une couche donnée.

Alors la roche s'endurcit et passe à l'état de marnolite, mais avec cette circonstance spécialement importante pour

la suite de nos études, que l'induration n'est pas uniforme et au contraire commence autour de certains points, pour s'étendre peu à peu à des régions de plus en plus vastes. Autour de ces centres d'attraction il se constitue d'abord une sorte de grumeau plus ou moins sphéroïdal et qui se grossit incessamment par des revêtements de calcaire. Le nodule ainsi produit conserve d'ailleurs dans sa structure, les détails de constitution du limon primitif, et les variations de grosseur des grains y persistent d'une façon parfaite. Cependant il y a eu très certainement échange de matière : le calcaire concrétionné a dû de toute nécessité et pour se faire place, refouler une partie de la matière encaissante : mais l'opération s'est faite si lentement, que c'est comme une sorte de substitution de molécules nouvelles à des molécules précédentes sans altération de la structure. On va voir le jour que ces remarques si élémentaires jettent sur des questions à première vue beaucoup plus compliquées.

Les nodules une fois constitués peuvent grossir tant que les zones supérieures de la formation sont aptes à fournir du carbonate de chaux, et il arrive qu'ils atteignent et dépassent même le volume de la tête ; ils peuvent se souder ensemble et donner lieu à des bancs tuberculeux subordonnés au limon, au grand déplaisir d'ailleurs des exploitants, par exemple aux environs de Mantes (Seine-et-Oise).

Il faut rapprocher des faits précédents la découverte dans la *terre rouge* de certaines cavernes du Brésil de véritables oolithes dont l'origine est conséquemment bien récente¹.

Les réactions chimiques de la nappe superficielle se manifestent parfois par la production de masses à base métallique comme celles de limonites ou d'acérodèse. Le minerai de fer des prairies, dont l'origine se rattache au

1. V. d'Archiac, *Leçons sur la faune quaternaire*, p. 253.

moins quelquefois à des phénomènes biologiques, est à mentionner ici ; et à côté de lui l'acérodèse qui constitue dans sa compagnie des dendrites si fréquentes sur toutes les roches. A cette occasion on peut mentionner la rencontre récente, en plein gravier quaternaire, d'une vraie poche d'oxyde de manganèse, lors des travaux du chemin de fer métropolitain de Paris à la traversée de la place de la Concorde.

Enfin, pour ne laisser sans mention aucun des points les plus essentiels qui concernent l'histoire de la nappe d'eau superficielle, il convient de rappeler qu'elle exerce sur les corps organiques enfouis une action souvent si énergique qu'elle en amène la disparition. C'est quand elle est encore chargée de l'oxygène qu'elle avait dissous par son contact avec l'atmosphère.

Une fois privée de gaz comburant, elle peut déterminer des modifications de composition qui sont un acheminement vers la fossilisation proprement dite. Il est impossible de nous y appesantir ici, les faits dont il s'agit étant trop connus.

5. — LA MER

La première idée qu'inspire au géologue la vue de l'océan ou d'un grand lac, c'est celle d'un gigantesque laboratoire dans lequel se réalisent des fonctions très nombreuses et très diverses : la mer sera pour nous l'un des mécanismes les plus volumineux de toute la physiologie tellurique.

La mer est en mouvement continu et il est facile de distinguer entre plusieurs genres les activités mécaniques qui l'animent. Ses flots qui en font un outil de trituration et de brassage, non seulement de particules rocheuses mais même de fluides entre eux puisque c'est la raison de la dissolution dans l'eau de l'air nécessaire à la vie aquatique ;

ses flots ne tiennent pas à la même cause motrice que ses marées et celles-ci sont encore distinctes des courants réguliers qui constituent tout un réseau dans la masse océanique. Dans beaucoup de cas, ces différentes formes de mouvement se comportent de façon à collaborer à un résultat commun et c'est ainsi par exemple que la mer montante, venant baigner le pied de sa falaise, agit en même temps par son ascension et par ses vagues pour démolir les roches qu'elle peut atteindre et en éparpiller les débris.

Au point de vue géologique, la mer se présente comme réalisant simultanément, avec une intensité variable suivant les points, un double travail de démolition et de sédimentation. Nous n'avons pas évidemment à entrer dans la description de ces deux fonctions qui sont bien connues et nous nous contenterons de quelques observations très générales à leur sujet.

La mer fonctionne comme agent de démolition, avec une activité toute spéciale contre le pied des falaises qui la bordent et nous avons sur nos côtes de la Manche le type des localités où le fait peut être le mieux étudié. En les visitant, on est frappé de l'incapacité où devrait être la mer livrée à elle-même de continuer longtemps l'action dont il s'agit. En effet elle ne mouille le pied de ses falaises qu'à la marée haute et jamais elle ne dépasse en hauteur un certain maximum, qui est réalisé au cours de quelques grandes marées d'équinoxe. Il est donc évident qu'après avoir atteint, dévasté et balayé tout ce qui concerne ce niveau maximum, elle devrait cesser de toucher le pied de la muraille qui la limite. Bientôt cette muraille perdrait son caractère marin pour acquérir le profil intempérique, comme nous en procure un exemple très net la falaise de Cayeux (Somme) ¹.

Pour expliquer que l'action dénudatrice puisse persister, il faut admettre qu'au fur et à mesure que les flots

1. Voyez mon ouvrage intitulé *Les causes actuelles en géologie*, 1879, p. 166.

détruisent le relief continental, de nouvelles portions de côte sont remises à sa disposition et cela ne se peut évidemment réaliser que par un affaissement progressif du sol. Il est très remarquable de voir ainsi réunies dans une même œuvre, l'activité superficielle de la mer et l'activité profonde des régions infragranitiques. Nous avons des preuves directes de l'envahissement récent par la mer d'une large bande de notre littoral normand et breton, et il importe ici d'en signaler les conséquences au point de vue de la dénudation marine. C'est seulement dans des pays constitués comme celui-là, non seulement en ce qui concerne les formes de leur relief, mais encore par l'économie de leurs régions souterraines, que l'attaque continue des falaises, et par conséquent l'envahissement continu du sol continental, peut avoir lieu.

Le caractère dominant de la sédimentation marine c'est l'exactitude des triages qui s'exercent entre les diverses particules abandonnées dans le bassin aqueux. Il suffit que deux fragments rocheux diffèrent l'un de l'autre, soit par leur poids, soit par leur forme, soit par leur densité pour qu'ils soient destinés à se séparer et à gagner progressivement des points différents où ils rencontreront les conditions favorables à leur stabilité de situation. On est émerveillé sur bien des côtes de la délicatesse avec laquelle des séparations de ce genre sont réalisées, rappelant les produits de bien des manipulations industrielles. Les côtes de Bretagne, dans le Finistère comme dans le Morbihan ou la Loire-Inférieure, nous en procureraient entre autres d'innombrables exemples. Les roches constitutives des falaises essentiellement granitiques, étant de compositions minéralogiques très compliquées, il est curieux d'y suivre le destin de chacune des catégories de grains auxquels leur désagrégation donne naissance. Ici des galets de granit s'accumulent, comme à Dieppe les galets de silex, mais le sable qui n'est plus homogène comme dans les pays de craie se scinde en

lambeaux très divers ; le quartz, le mica, la fine poussière provenant du broyage si facile à cause de ces clivages de la matière feldspathique, s'entassent chacun dans un point particulier et, en parcourant le littoral à marée basse on foule successivement en outre, de petites plages faites les unes de petits grenats, d'autres de granules de cassitérite, ou d'autres minéraux encore.

C'est là évidemment l'origine de cette particularité des terrains stratifiés de tous les âges, d'être de composition minéralogique très homogène, abstraction faite, bien entendu, des substances engendrées dans leur masse, après leur dépôt par la circulation de la nappe d'eau souterraine. On constate d'ailleurs encore mieux cette génération de matériaux homogènes comme résultat du triage de falaises complexes dans des pays moins compliqués comme la ligne littorale de la haute Normandie.

La craie dont les falaises sont faites s'est enrichie de nodules siliceux plus récemment concrétionnés dans l'épaisseur de ces assises. La démolition à laquelle la mer la soumet en retire trois catégories principales de matériaux que nous pouvons rattacher aux trois types classiques du galet, du sable et du limon.

Ces produits d'une désagrégation simultanée sont entraînés par le reflux de façon fort inégale, strictement réglée par les qualités de chacun d'eux. Les galets abandonnés tout de suite par les filets d'eau, se groupent en un bourrelet ou cordon littoral, derrière lequel s'étalent d'abord une bande de sable correspondant à la zone de balancement des marées, puis une large surface de limon qui s'étend aussi loin du rivage que les courants, non encore débarrassés par précipitation de tous les troubles dont ils s'étaient chargés.

Comme il s'agit d'une mer qui ronge ses côtes et qui envahit peu à peu le continent, on s'aperçoit que la falaise reculant peu à peu entraîne pour ainsi dire avec elle, c'est-à-dire vers les terres, les régions favorables au dépôt

de chacun des membres de la trilogie sédimentaire dont nous venons de parler. A chaque instant le cordon de galet se fait à l'extérieur d'un cordon précédent auquel il est d'ailleurs intimement soudé et pendant ce temps la zone sableuse et la zone limoneuse s'élargissent d'annexes qui s'établissent, la première sur la région la plus interne du cordon de galets et l'autre sur la région la plus interne de la bande arénacée. Il en résulte que les trois dépôts, marchant de conserve mais en retard l'un sur l'autre, s'avancent à la conquête du continent dont ils recouvrent la tranche supérieure arasée, de trois formations qui malgré leur superposition sont cependant du même âge.

On verra que ce mécanisme, dont il est facile d'étudier tous les détails, éclaire la constitution d'une foule de localités anciennes.

Pendant que ces phénomènes se développent dans les régions littorales et thalassiques, des productions différentes, qui se déclarent dans les points pélagiques ou même abyssaux, complètent la série des sédimentations qui prennent naissance dans le laboratoire de la mer. A cet égard, les croisières scientifiques telles que celles du *Travailleur* et du *Talisman*, du *Challenger*, du *Porcupine* et d'autres, nous ont procuré les résultats les plus précieux. La comparaison des divers sédiments simultanément accumulés dans les points inégalement profonds de la mer, a conduit à la conception des faciès marins dont nous rappellerons plus loin les applications principales à la Géologie stratigraphique.

Les courants de la mer interviennent de leur côté de la façon la plus décisive, soit pour collaborer à des démolitions rocheuses, soit pour procéder à l'édification de formations nouvelles.

En ce qui concerne le premier fait, on peut noter l'influence de certains courants pour débarrasser le pied des falaises de l'accumulation des galets qui lui constituerait un brise-lame plus ou moins efficace et retarderait

ainsi, dans une certaine mesure, la dénudation ordinaire. Ainsi, sur nos côtes de la Manche le courant transporte progressivement les matériaux du Sud-Ouest vers le Nord-Est et c'est ainsi que des galets granitiques, originaires du Cotentin, se traînent de proche en proche jusqu'à l'embouchure de la Somme.

Pour ce qui est de la faculté sédimentaire des courants de la mer, on peut rappeler d'abord la croissance rapide sous leur influence du banc de Terre-Neuve. Celui-ci, en effet, s'est constitué sur la frontière commune du courant froid venant des régions boréales et de la branche ascendante chaude du Gulf-Stream originaire des pays tropicaux. Les iceberg chargés de matériaux rocheux fondent sous l'influence de ces effluves chaudes et abandonnent à la pesanteur les débris qu'ils transportaient. C'est l'accumulation de ceux-ci qui, d'année en année, augmente la masse du banc.

L'entrée dans la mer des courants aqueux venant des continents sous la forme de fleuves, est l'origine de plusieurs phénomènes qui doivent être mentionnés ici.

D'une part, il se fait sur le fond submergé des sillons qui continuent les vallées et qui ont été étudiés par plusieurs géologues, dont les conclusions ne sont d'ailleurs pas absolument unanimes.

D'autre part, la destruction de force vive, infligée au cours d'eau douce par l'inertie relative de la masse marine, détermine la précipitation des matières charriées et en conséquence l'édification de massifs nouveaux.

À cet égard, l'ensablement de beaucoup d'embouchures mérite une mention, car il a des conséquences avec lesquelles on a trop souvent à compter. C'est d'ailleurs une forme, entre plusieurs autres, d'un phénomène qui se manifeste ailleurs par la constitution des flèches littorales.

Celles-ci sont spécialement éloquentes pour montrer l'extraordinaire précision avec laquelle les moindres mo-

difications dans le régime dynamique des masses liquides se traduisent par l'allure des dépôts au contact desquels elles se trouvent. Les flèches littorales régularisent le profil de certaines côtes découpées et nous procurent des vrais stéréogrammes des courants de la mer.

C'est aussi à cette espèce de conflit entre des courants divers qu'il faut rattacher la constitution des deltas dont on verra plus loin d'importantes applications géologiques. Dans cet ordre d'études, l'expérimentation a, comme on le sait, apporté à l'observation un précieux complément de lumières.

Le résultat principal qu'on en a obtenu, c'est que le dépôt des troubles apportés par les fleuves dans le bassin océanique, ne se fait pas d'une manière quelconque, mais résulte au contraire d'un triage extrêmement délicat. A chaque instant, la masse des débris s'étale en un lit très mince dans lequel chaque catégorie de substance caractérise une zone. La précipitation successive de lits de ce genre, en rangeant les unes contre les autres les zones faites de la même manière, édifie simultanément plusieurs dépôts qui se recouvrent par un mécanisme analogue à celui que nous voyions tout à l'heure pour les matériaux littoraux, mais qui donne un résultat précisément inverse. Ici, contrairement à ce que nous procurait le cas précédent, ce sont les matériaux fins qui donnent la couche la plus profonde et les substances grossières et lourdes qui se déposent par-dessus. Il résulte de cette différence des éléments d'étude qui seront d'un grand prix pour déterminer le mode de formation de dépôts déjà constitués.

Il importe beaucoup d'ajouter ici que le grand laboratoire océanique ne procède pas seulement à des réactions mécaniques et qu'il s'y développe, au contraire, maints phénomènes chimiques dont les produits interviennent dans les formations les plus variées.

L'eau de la mer peut agir sur les roches qu'elle baigne

et y déterminer des productions minérales variées. Nous savons, par exemple, que certaines vases, sous son influence, engendrent des cristaux de zéolithes.

Parmi les réactions chimiques qui se développent dans les profondeurs sous-marines, il faut faire une place à celles qui provoquent la précipitation de l'oxyde de manganèse hydraté ou *acerdèse*. Les naturalistes du *Challenger* ont étudié avec grand soin ces concrétions noires et légères qu'ils appellent « wad ».

C'est parmi les actions chimiques de l'océan qu'on a rangé la régulation de l'acide carbonique contenu dans l'atmosphère, M. Schlœsing a publié à cet égard un travail qui a été remarqué. D'après ce savant, la constance avec laquelle le gaz carbonique est mêlé à la dose de 0,003 dans l'air tient à cette double circonstance que si la proportion tendait à augmenter, une quantité correspondante de carbonate de chaux en suspension dans la mer passerait à l'état de bicarbonate calcique et que si à l'inverse il y avait velléité de diminution, un poids convenable de bicarbonate de soude dissous se dissocierait et dégagerait le gaz déficient.

Cette régulation relative à l'acide carbonique a comme une espèce d'analogie dans l'activité variable avec laquelle la mer doit alimenter une évaporation dont l'effet est d'empêcher la dessiccation de l'atmosphère : et dans tous les cas la masse océanique se présente comme un organe procédant à une fonction nettement définie.

6. — LE GLACIER

Nulle part plus que dans le glacier on ne trouve réunies les qualités d'un organe de la physiologie tellurique. C'est un agent de circulation continu pour l'eau ; c'est un agent de transport incomparable pour des matériaux rocheux de toutes les dimensions ; c'est un agent de

dénudation à la fois direct et médiat, car à sa puissance propre vient s'ajouter le redoublement d'énergie qu'il procure à l'intempérisme.

Il est nécessaire d'insister un moment sur ces différents points.

Au point de vue de la circulation atmosphérique de l'eau, le glacier se signale par son efficacité. C'est un merveilleux appareil de condensation de l'humidité atmosphérique, qui s'y convertit en neige, puis en névé et en glace, aux divers points de la vallée glaciaire. Sous l'influence de son propre poids et grâce à la forme du sol, la glace acquiert une mobilité spéciale qui l'a d'abord fait comparer, inexactement d'ailleurs, à un corps plastique. Elle s'écoule suivant la pente du terrain et ne s'arrête qu'au point où la température ambiante détermine sa fusion, et qu'on regarde comme la source du torrent qui lui fait une suite nécessaire et le décharge par une compensation exacte des acquisitions successives en neige de sa région supérieure.

Ce nom de source doit d'ailleurs être accepté avec cette remarque, que le torrent circule déjà sous le glacier bien au-dessus du point où il apparaît au jour. Malgré sa basse température, la glace est associée à l'eau liquide dans la plus grande partie du glacier : toutes les crevasses sont ruisselantes et le Soleil de ses premiers rayons liquéfie de tous côtés de petits ruisselets et des mares ; sur les deux rives, des chutes et des torrents apportent de l'eau qui s'insinue sous la glace.

Non seulement l'eau liquide est partout ; mais encore la glace et la neige fournissent à une évaporation active, même par le froid et dès que le vent souffle ; de sorte que le glacier, centre de condensation, est en même temps un centre de dispersion aqueuse.

Comme agent de transport de particules rocheuses de toutes dimensions, le glacier jouit de propriétés tout à fait spéciales. Le poids ou la densité relative des débris n'in-

tervient pas : toutes les pierres, même les plus denses et les plus grosses, sont portées sur le dos du glacier comme des corps flottants. La distribution des vitesses y étant calquée sur celle qu'on observe dans le cours d'eau, la destinée de ces flotteurs est analogue à celle des corps légers que charrient les rivières et on les voit s'accumuler sur les berges en cordons longitudinaux.

Quelques particularités pourtant les singularisent et spécialement celles qui concernent les affluents et la terminaison finale comparable à l'embouchure. Au premier point de vue, le mélange des filets provenant de deux glaciers qui se confondent, n'étant pas possible comme ceux des filets constitutifs des cours d'eau, les lisérés de corps flottants se combinent en traînées longitudinales dites moraines médianes. Au deuxième, les corps minéraux portés jusqu'à la région de fusion, au lieu de constituer un delta ou quelque sédiment, s'accumulent sans ordre en un bourrelet connu sous le nom de moraine frontale et qui fait comme une fortification derrière laquelle le glacier vient mourir.

Ces diverses moraines présentent des traits de constitution qui ne permettent pas de les confondre avec les produits d'autres modes d'activité géologiques. Elles ont en outre une forme extérieure bien caractéristique aussi, au point qu'on a pu, à l'exemple de Desor, donner le nom de *morainique* au paysage dont elles sont le trait essentiel.

Les glaciers aboutissant à la mer donnent lieu, au point de vue de la circulation des matières rocheuses, à des particularités toutes spéciales. Ils précipitent de leur front des quantités de matériaux au fond de l'eau où ceux-ci ne sauraient s'accumuler sous forme de moraine, les courants les triant plus ou moins par grosseur et les étalant en nappes affectant des allures analogues, à certains points de vue, à celles des sédiments ordinaires. D'innombrables fjords se sont comblés de cette contribution glaciaire.

D'un autre côté, les blocs de glace détachés sur le front terminal s'en vont, sous forme de *iceberg*, au fil des courants océaniques et laissent choir sur le sol sous-marin des traînées de débris rocheux et de gros blocs essentiellement erratiques.

Enfin, considéré comme agent de dénudation, le glacier se signale d'une façon très particulière.

Il a d'abord, sur les roches qui l'entourent, une action pour ainsi dire indirecte et qui est extrêmement sensible. Il exaspère, en effet, l'activité de l'intempérisme, augmentant le volume des pluies dans son voisinage et provoquant les congélations locales dont l'effet est la désagrégation des roches plus ou moins poreuses. D'un autre côté, la faculté de transport dont nous avons déjà parlé intervient ici d'une façon décisive en retirant à chaque instant aux parois dénudées la protection que leur procure ailleurs l'accumulation des éboulis.

Mais c'est directement, en agissant sur les roches qui lui fournissent un appui, que le glacier réalise la part la plus caractéristique de son action dénudatrice. Et chose très curieuse, son efficacité à cet égard a été contestée et n'est admise encore maintenant par certains géologues qu'avec des restrictions et comme à regret.

Nous avons, pour l'année 1885, un résumé de l'opinion générale dans ce passage¹ :

« Nulle part on n'a vu les glaciers creuser, affouiller un lit composé de roches dures, ni découper leurs parois comme font les torrents... Un glacier n'est donc pas, comme un torrent, un instrument efficace d'érosion... ; autant qu'on en peut juger par ce qui se passe aujourd'hui, un glacier ne crée pas sa vallée, etc. »

En 1893, l'opinion générale était bien changée à l'égard des glaciers comme agents d'érosion. Voici le résumé de l'opinion régnant à ce moment² :

1 De Lapparent, *Géologie*, 2^e édit., p. 285, 1885.

2. De Lapparent, *Géologie*, 3^e édit., p. 279 et suiv.

« On a beaucoup discuté sur la puissance d'érosion des glaciers. Quelques-uns la croient considérable ; d'autres seraient portés à la regarder comme négligeable. La vérité semble se trouver entre ces deux extrêmes... En principe puisqu'un glacier est un fleuve de glace dont l'allure ne diffère de celle des eaux courantes que par une vitesse incomparablement moins grande, il doit comme les fleuves tendre vers un profil d'équilibre et tant que ce profil n'est pas atteint, le pouvoir de la glace doit s'employer à modifier en conséquence la forme du lit... même les roches dures du fond ne peuvent échapper à cette action, car les blocs que transporte la glace, poussés par une pression considérable, agissent sur le fond et les parois comme de puissants outils, etc. »

L'érosion glaciaire est un des chapitres où l'évolution des idées s'est faite le plus nettement dans ces dernières années. Il y a bien longtemps que, pour ma part, j'ai soutenu l'opinion que les glaciers réalisent par leur frottement sur les roches qui les supportent un énergique travail d'érosion. Sans remonter à l'origine des choses, j'écrivais en 1891¹ :

« Déjà j'ai eu bien souvent l'occasion de faire remarquer que la zone des roches moutonnées au-dessus de la glace dans les glaciers des Alpes et d'ailleurs, correspond à des points où la glace n'atteint plus fortement, parce que, grâce à son action érosive, elle a pénétré verticalement dans la masse rocheuse sous-jacente. Elle est vraiment comparable à une scie entrant dans une pièce de bois et qui bientôt se meut au-dessous de points qu'elle a sciés précédemment mais qui ne datent pas d'un temps où sa lame aurait été plus large. »

Aujourd'hui, la réalité et l'importance de la dénudation glaciaire est reconnue par un très grand nombre

1. Voyez la livraison du 15 janvier 1892 du journal *Le Naturaliste*, n° 117, p. 19

d'observateurs, parmi lesquels on peut citer comme tout à fait récents, M. Richter¹ et M. W. Salomon².

D'ailleurs, il faut remarquer qu'elle s'exerce en même temps d'une façon médiate, c'est-à-dire en provoquant une recrudescence d'activité chez les agents ordinaires de l'intempérisme. Grâce à eux, les roches du voisinage sont attaquées avec une énergie exceptionnelle, toujours efficace à cause de la rapidité avec laquelle le glacier entraîne les égravats qui ailleurs font un manteau protecteur plus ou moins persistant sur la tranche des roches dénudées.

Cette attaque se poursuit même aux dépens des roches *moutonnées*, suivant l'expression devenue classique de Saussure³, et la remarque vaut d'être faite à cause des conséquences possibles dont elle est susceptible.

En effet, dans les excursions sur la Mer de glace, aux Ponts et au Mauvais-Pas, comme dans celles sur les glaciers de la Haute-Engadine et de bien d'autres régions, j'ai été frappé de ce fait que le poli des roches moutonnées qui dominant la glace n'est pas le même à toutes les hauteurs : même de loin on constate très nettement en bien des points qu'il est de plus en plus imparfait ou altéré à mesure que l'on s'élève. En outre, la limite supérieure des polis est très loin d'être aussi nette que la limite supérieure du glacier et on voit des lambeaux de roches polies séparés de la masse générale, située plus bas, des roches moutonnées,

Il semble que ces particularités très curieuses s'expliquent nettement dans la manière de voir que j'ai déjà développée sur la pénétration verticale du glacier dans la masse des roches qui le supportent, par un mécanisme

1 Geomorphologische Untersuchungen in den Hochalpen, *Petermann's Mitteilungen*, 132^e livraison, 1900, p 103.

2. Konnen Gletscher ein austehenden Fels Kare, Loebecken und Thaler erodieren ? — *Neun Jarbuch fur Mineralogie Geologie und pateauologie*, 1900, t. II, p 117-138, 2 pl.

3 *Voyage dans les Alpes*, Neuchâtel, 1803 (4 volumes), § 1061.

identique à celui qui fait pénétrer dans une pierre le fil émerisé du lapidaire. En effet, l'âge des différentes parties du polissage est loin d'être le même ; les parties hautes sont plus anciennes que les autres et, en conséquence, elles ont éprouvé plus longtemps l'action désagrégeante des intempéries : en même temps que les roches moutonnées gagnent par en bas par la pénétration du glacier dans le sol, elles perdent par en haut par l'intempérisme. Et on peut en inférer qu'elles ont pu jadis atteindre une altitude encore plus haute que celle observable aujourd'hui ; de sorte que le procédé employé d'ordinaire pour restaurer les anciens glaciers devrait conduire à leur donner encore une bien plus grande dimension qu'on ne le fait d'ordinaire.

Remarquons enfin que la dénudation glaciaire, soit directe, soit médiate, revêt tous les traits essentiels de la dénudation fluviale, de sorte qu'elle affecte une allure régressive se traduisant par le phénomène de *capture* très nette que j'ai reconnu dès l'année 1897¹ et qui a été confirmée, en 1898, par sir Martin Conway et en 1899, par M. Williard D. Johnson.

7 — L'ATMOSPHÈRE

Ce n'est que depuis une époque relativement récente qu'on s'est pénétré de toute l'efficacité géologique de l'océan aérien et qu'on a reconnu la réalité d'une dénudation et d'une sédimentation « éoliennes ».

Considérée dans son ensemble, l'atmosphère présente avec la mer d'étroites analogies et les différences principales viennent du contraste des densités des deux fluides. Seulement, nous sommes bien loin d'être dans la même situation pour les étudier l'un et l'autre et peut-être la comparaison plus parfaite des résultats que chacun d'entre

1. *Comptes rendus*, t. CXXIV, p. 1043. Séance du 10 mai 1897.

eux nous laisse obtenir nous procurera-t-elle une notion plus complète de tous les deux. Pour l'atmosphère nous sommes un peu dans la condition où doivent être les êtres sous-marins relativement à l'océan : ils ne connaissent point l'état de sa surface et, si quelque contre-coup leur arrive parfois de son agitation, ils n'ont aucune perspective de connaître jamais la cause de celle-ci. C'est sans doute la raison qui fait de la météorologie la plus incertaine des branches d'étude, celles où manque le plus toute base pour des recherches systématiques.

L'atmosphère considérée en masse intervient de façons diverses dans la physiologie tellurique : tantôt mécaniquement et tantôt chimiquement. Voyons successivement et très rapidement ce qui concerne ces deux points de vue.

Tout d'abord la mobilité de l'air le rend apte à réaliser des actions dénudatrices qui dans certains cas peuvent prendre une grande intensité. Il va sans dire d'ailleurs que le frottement du gaz ne saurait user directement les roches sur lesquelles il s'exercerait. Seulement dans la réalité l'air en mouvement charrie toujours des poussières et celles-ci, même quand elles sont très fines, peuvent à cause de leur dureté agir comme des burins aux dépens des roches qu'elles rencontrent. On en a une preuve bien éloquente par le dépoli qu'acquièrent en peu de temps les vitres des cabines de bains dans les pays de dunes de sable, et une fois prévenu on en voit les effets sur les roches les plus variées et dans une foule de localités. J'ai signalé depuis longtemps à cet égard les grès quartzeux des Friches de Poligny, près de Nemours, que la friction des sables poussés par le vent a recouverts d'une surface vraiment émaillée. La figure 9 représente un curieux galet pareil à ceux qui abondent en certains points des anciennes alluvions du Rhône et qui présentent des facettes plus ou moins planes dues au rabotage que leur a infligé depuis qu'ils sont abandonnés par les eaux, la friction des sables poussés sur eux par les vents.

M. Thoulet (de Nancy) a soumis le phénomène à une étude précise, à l'aide d'un appareil qui a permis de définir toutes les conditions de la dénudation éolienne.

L'air charriant des matières minérales les dépose dans les points où sa vitesse est convenablement diminuée, se conformant exactement aux lois qui président à la sédimentation aqueuse. Les pluies de poussières portées préalablement dans les hautes régions de l'atmosphère soit par des vents tourbillonnants, soit par des trombes auxquelles

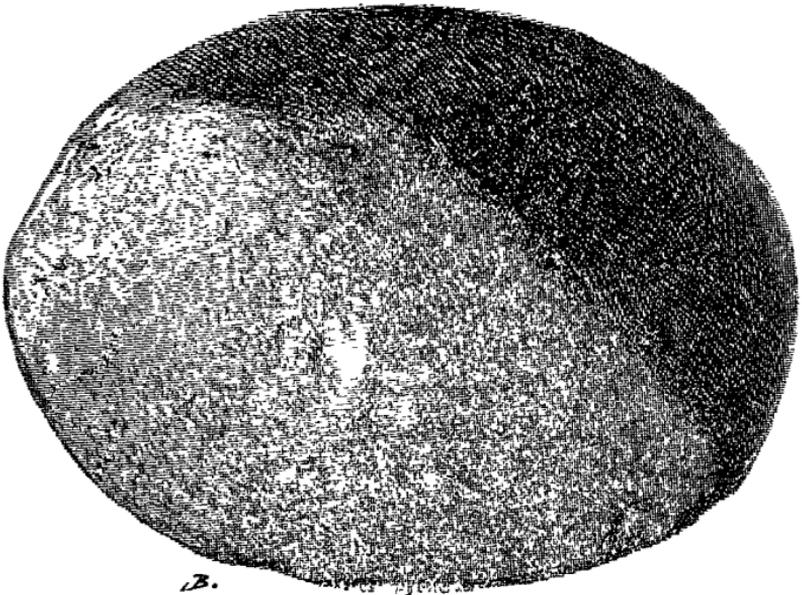


FIG. 9 — Galet à facettes des alluvions du Rhône comme exemple de la dénudation éolienne

l'électricité prend part, soit par des poussées volcaniques, se constatent dans des régions et à des époques très diverses.

Le type le plus ordinaire pour nous est celui qui s'est trouvé reproduit du 9 au 12 mars 1901 dans une vaste région comprenant le Nord de l'Espagne et les portions méridionales et centrales de l'Europe. J'ai eu l'occasion d'en étudier un échantillon recueilli pour moi par M. le

marquis de Gregorio, à Palerme, et j'y ai trouvé une composition qui concorde avec celle des portions les plus fines du sable du Sahara. MM. G. Hellmann et W. Meinardus ont publié une monographie de ce grand phénomène¹.

On sait que la surface de l'Océan atlantique dans les parages des îles du Cap Vert est très fréquemment saupoudrée d'apports de ce genre et il faut en conclure que le sédiment sous-marin, même par de très grandes profondeurs, doit être additionné de matériaux qui, si on n'en savait pas l'origine, pourraient sembler s'opposer à la reconnaissance du faciès byssal dans les masses qui le contiennent.

Le volume des matériaux déposés par le vent varie beaucoup d'un cas à l'autre : comme extrême je me bornerai à citer un seul exemple mais qui m'a paru remarquable.

Le 6 juin 1891, des cultivateurs de Pel-et-Der, arrondissement de Brienne, département de l'Aube, retournant aux champs d'où venait de les chasser, vers cinq heures du soir, un violent orage mêlé de grêle et de grand vent, furent très surpris de trouver la terre entièrement couverte de petites pierrailles différant absolument à première vue de toutes les roches du pays. Les fourrages fauchés les jours précédents et des tas de fumier déposés la veille étaient recouverts de ces matériaux insolites.

D'après une lettre que M. Charles, juge de paix de Brienne, a bien voulu m'écrire, la surface ainsi lapidée mesure 200 mètres de longueur et 50 mètres de largeur. Selon un autre correspondant, c'est sur 16 hectares que le phénomène se serait développé.

Dans tous les cas, personne ne fait de doute que les cailloux n'aient été précipités sur le sol au moment de l'orage, et ce n'est pas sans quelque peine qu'on a persuadé à tout le monde qu'il ne s'agit aucunement d'une averse météoritique.

1. *Der Grosse Staubfall vom 9 bis 12 marz 1901*, in-4 avec 6 planches. Berlin, 1901.

A en juger par les spécimens que j'ai sous les yeux et dont deux, de grosseur moyenne, sont représentés ci-contre (fig. 10), les pierrailles de Pel-et-Der sont de dimension variant de 20 à 50 millimètres. Elles sont en général arrondies comme des galets, aplaties et de forme très irrégulière offrant de nombreuses dépressions cupuliformes et même des tubulures. Plusieurs, comme le montre précisément l'échantillon de droite de la figure, sont perforés d'outre en outre par des canaux plus ou moins cylindriques. Toutes sont d'un blanc crayeux à l'extérieur, mais la cassure

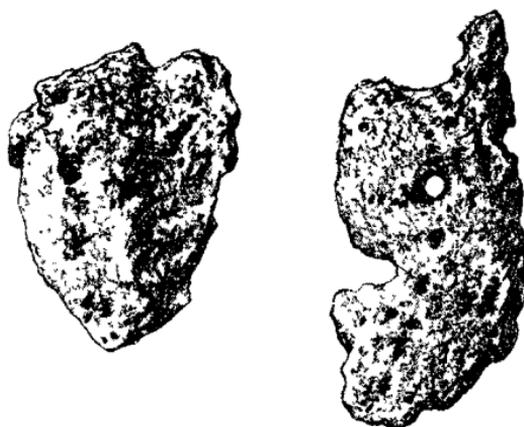


Fig 10 — Pierrailles calcaires tombées avec la grêle le 6 juin 1891 à Pel-et-Der (Aube)
Échantillons du Muséum de Paris Grandeur naturelle

montre qu'elles sont constituées par une roche compacte, d'un gris bleuâtre plus ou moins foncé. Il s'agit donc là d'une patine dont la production peut se rattacher sans doute au séjour dans le milieu très froid constitué par le nuage à grêle. Une goutte d'acide chlorhydrique suffit pour révéler la nature calcaire des pierrailles, et l'on est frappé, pendant l'effervescence, d'une assez forte odeur bitumineuse.

Le sol, à Pel-et-Der, est formé, sous une couche épaisse d'alluvions anciens, par la craie où, d'après la remarque de Leymerie ¹, « on trouve des ammonites et de nombreux

1. *Description Géologique du département de l'Aube.*

inocérames et jamais de silex, caractères qui doivent la faire rapporter à l'assise inférieure, malgré sa couleur qui est ordinairement blanche ».

Or, les essais chimiques auxquels j'ai soumis les pierres tombées le 6 juin et les comparaisons que j'en ai faites avec des spécimens conservés au Muséum, me conduisent à penser qu'elles sont constituées par le travertin tertiaire si abondant, par exemple, au Sud-Est du département de Seine-et-Marne, où il est connu sous le nom de calcaire de Château-Landon. Il a été facile d'assortir toutes les variétés de nuances et de structure. Des analyses sommaires ont permis de reconnaître tous les détails de la composition, et jusqu'à la proportion d'argile et de bitume que dégage la dissolution dans l'acide chlorhydrique.

Cette identité étant admise, et elle paraît tout à fait certaine, il convient de remarquer que Pel-et-Der est éloigné de plus de 150 kilomètres, à vol d'oiseau, du gisement le plus proche du travertin dont il s'agit. Il faut donc qu'un météore ait arraché sur le sol, pour l'enlever dans les hautes régions de l'atmosphère, une masse considérable de pierres qui ont ensuite parcouru horizontalement un très long trajet aérien avant d'être précipitées avec la grêle. Un pareil fait, par sa précision même, fournira peut-être des arguments aux discussions aujourd'hui pendantes sur les grands mouvements de l'atmosphère.

C'est naturellement au voisinage immédiat des régions sableuses que les sédiments éoliens doivent être le plus fréquents et le plus abondants. Les dunes, qui se rencontrent sur certaines côtes marines et dans certains déserts comme le Sahara, ont un mode de formation et une allure qui sont trop connus pour que nous ayons à y revenir. Ce qu'il faut remarquer, c'est que derrière ces dunes, le sol est généralement recouvert jusqu'à une distance plus ou moins grande, mais qui peut être considérable, d'un alluvionnement atmosphérique avec lequel on doit compter.

Tantôt il est nuisible à la végétation comme dans les plaines des environs de Dunkerque et dans les Landes, tantôt au contraire, il ajoute aux qualités du sol trop argileux comme en Égypte où les sables apportés par le Khamsin alternent dans le sol de la façon la plus heureuse avec les limons déposés par le fleuve.

L'importance géologique des alluvions éoliennes peut d'ailleurs prendre plus d'importance encore et c'est le cas pour le lœss d'après les études de M. de Richthoffen en Chine et de Virlet d'Aoust sur les hauts plateaux du Mexique.

Il faut ajouter que le phénomène dont il s'agit a cette conséquence très importante au point de vue de l'économie générale du globe, qu'il réalise un brassage complet de matières extrêmement diverses et va jusqu'à mélanger des matériaux volcaniques dans les sédiments de tous genres. On en a bien eu la preuve à la suite de la mémorable éruption du Krakatau dans le détroit de la Sonde en 1883, alors qu'on put dire sans exagération, que l'atmosphère entière du globe a été progressivement salie des déjections pulvérulentes du volcan. On a assisté au délayage véritable du nuage primitif de poussière qui détermina, sur une zone progressivement élargie, l'apparition de crépuscule et d'aurores roses avec coloration de la Lune et du Soleil levant en vert pomme.

Considéré chimiquement l'air est d'une activité parfois fort grande, au moyen des principaux composants dont il est formé et tout spécialement de l'oxygène et de l'acide carbonique.

Pour ce qui est de l'oxygène il détermine une foule de réactions dans les roches qui sont à quelque degré combustibles. Les schistes charbonneux sont brûlés lentement ; les roches contenant du fer au minimum sont rubéfiées, et ce dernier cas concerne surtout les matériaux ferrifères qui sont éliminés des roches par certains réactifs et par exemple par l'acide carbonique. C'est la cause de la

nuance rouge des terres végétales provenant de la décalcification de beaucoup de sédiments, tels que la craie ou les calcaires prussiques. C'est la cause de la couleur rougeâtre de la partie supérieure de beaucoup de sédiments ayant éprouvé le contact de l'air, comme le diluvium des environs de Paris, le terrain glaciaire des Alpes, les dépôts pliocènes du Midi de la France et dans une tout autre série les alluvions diamantifères du cap de Bonne Espérance.

Cette rubéfaction, considérée dans son ensemble, représente un cube gigantesque d'oxygène immobilisé.

Pour ce qui est de l'acide carbonique, il s'attaque par l'intermédiaire de l'eau météorique et de la nappe superficielle à des séries très variées de roches engendrant suivant les points, les latérites, les argiles à silex et certains kaolins. Nous n'y pouvons revenir et ce qui a été dit à propos de l'action aqueuse nous paraît suffisant, mais nous ne saurions toucher ce sujet sans faire une remarque qui paraît importante, à propos de l'origine du gaz carbonique de l'atmosphère.

L'échange de l'acide carbonique entre les plantes, qui le décomposent pour en fixer le carbone dans leurs tissus, et les animaux qui le reconstituent, en brûlant par digestion les matières végétales, est un des exemples les plus classiques des cercles harmoniques que l'étude de la nature nous offre de toute part. On est porté à en conclure à première vue qu'une quantité donnée, toujours la même et en définitive peu considérable, suffit aux besoins indéfinis du monde organique.

Or, il est loin d'en être ainsi, plusieurs causes énergiques concourant à soustraire de l'atmosphère l'acide carbonique qui s'y trouve dissous. Nous rappellerons parmi elles deux phénomènes particulièrement efficaces.

On sait tout d'abord que, sous l'influence des intempéries, une foule de roches subissent une altération profonde. Les unes sont désagrégées, d'autres dissoutes,

certaines même décomposées. Parmi ces dernières figurent les plus difficiles à attaquer par les réactifs employés en analyse, les masses silicatées et le granit lui-même.

Dans ce cas, maintenant étudié dans tous ses détails, et dont Ebelmen a fait un examen spécial, c'est l'acide carbonique de l'air qui est l'agent essentiel de la décomposition. Grâce à l'humidité qui l'accompagne, cet acide, tout faible qu'il paraisse, mord à la longue sur les silicates les mieux constitués, tels que les feldspaths, les pyroxènes, les amphibodes, les micas, et leur arrache leur protoxyde pour en faire des carbonates plus ou moins solubles. Ceux-ci, repris par les eaux, sont entraînés ou dissous et se transforment à l'infini, jusqu'à ce qu'ils acquièrent l'état définitif de calcaire stratifié.

Le résidu argileux ou kaolinique de cette sorte d'altération du feldspath permet par son volume d'évaluer l'énorme quantité d'acide carbonique soustrait à l'atmosphère par la réaction si bien étudiée par Ebelmen et qui est immobilisée dans l'épaisseur de la croûte terrestre sous une forme où les êtres organisés ne sauraient l'aller chercher.

Le second ordre de faits auxquels nous faisons allusion tout à l'heure est relatif à la fossilisation des matières végétales. Il est clair que la constitution des couches de tourbe, de lignite, de houille et d'anhracite a coûté à l'atmosphère une dépense gigantesque d'acide carbonique qui lui a été pris par les plantes, suivant le mécanisme physiologique qu'on peut observer aujourd'hui. Et il ne faut pas oublier qu'aux assises *exploitables* de combustibles minéraux doit s'ajouter, au point de vue où nous sommes placé, l'incalculable quantité de particules charbonneuses qui imprègnent les roches les plus variées, depuis les argiles et les sables ligniteux des terrains récents, jusqu'aux ampélites des couches siluriennes.

De ces deux chefs : kaolinisation des roches feldspathiques et fossilisation des matières végétales, l'atmo-

sphère a dû fournir à une dépense immense d'acide carbonique, qui depuis lors s'est trouvé immobilisé. On peut remarquer, en effet, qu'une couche de calcaire recouvrant le globe d'une épaisseur de 8^m,60, représente un poids d'acide carbonique égal à celui que renferme l'atmosphère actuelle ; d'après nos données géologiques, la quantité des calcaires et des dolomies contenus dans la croûte terrestre et qui se seraient déposés depuis l'apparition de la vie organique, dépasserait probablement d'au moins deux cents fois cette épaisseur.

Ce résultat positif une fois acquis, on reconnaît que l'hypothèse d'où nous partions, du cercle harmonique où la respiration animale et la respiration végétale se contrebalancent, doit évidemment, tout en subsistant, subir des modifications. On peut se demander d'abord si ces fonctions physiologiques n'ont pas, dans le cours des temps, été constamment en s'affaiblissant, la quantité d'acide carbonique en présence de laquelle la vie se déployait allant toujours en diminuant. Mais il faut renoncer à cette supposition dès qu'on essaye de se figurer ce que deviendrait l'atmosphère remise en possession des torrents d'acide carbonique que pourraient fournir les carbonates et les charbons fossiles. Outre qu'un pareil milieu serait d'une composition chimique incompatible avec l'exercice des fonctions vitales, la pression qu'il se ferait éprouver à lui-même, à cause de son épaisseur, serait suffisante pour en convertir une très grande proportion, non seulement à l'état liquide, mais même à l'état solide.

On ne voit pas comment on pourrait attaquer l'enchaînement logique des données précédentes, et leur conséquence nécessaire est évidemment que l'acide carbonique atmosphérique n'a pas été versé dans l'air une fois pour toutes à l'origine des choses, mais qu'il dérive au contraire d'une source continue qui le fournit peu à peu.

C'est en partant de ces faits qu'un géologue américain très distingué, Sterry Hunt, est arrivé à émettre une sup-

position qui montrera, par son étrangeté, la difficulté du problème. « Je pense, dit-il ¹, que l'on doit considérer notre atmosphère comme un milieu cosmique et universel, condensé autour des centres d'attraction en raison de leurs masses et de leurs températures, et occupant tous les espaces interstellaires dans un état de raréfaction extrême. Dans cette manière de voir, les atmosphères des divers corps célestes seraient à l'état d'équilibre entre elles ; d'où il résulterait que tout changement survenant dans l'enveloppe gazeuse d'une planète quelconque, soit par la condensation de la vapeur d'eau ou de l'acide carbonique, soit par la mise en liberté d'oxygène ou de tout autre gaz, se ferait ressentir, par suite de la diffusion, dans l'atmosphère de toute autre planète. Ainsi, pendant les périodes où une grande absorption d'acide carbonique aurait eu lieu à la surface du globe, notre atmosphère aurait été sans cesse alimentée par de nouvelles portions de ce gaz provenant du milieu universel, et, par suite, des enveloppes gazeuses des autres planètes. De là, il résulterait que la proportion d'acide carbonique aurait subi, dans l'atmosphère de tous les corps célestes, des diminutions égales ; et, en même temps, que tout excédant d'oxygène dégagé à la surface de notre globe se serait également réparti sur les corps célestes ».

En définitive, dans cette manière de voir, si la Terre ou un autre astre vient à consommer en quantité exagérée l'un des éléments de son atmosphère, l'espace est là pour réparer ses pertes. Bien loin que la végétation houillère se soit si singulièrement développée à cause d'un excès d'acide carbonique de l'air, c'est au contraire parce qu'elle prospérait, qu'elle a déterminé l'arrivée du gaz extraterrestre consommé plus vite que de raison ; il reste à expliquer, dans cette étrange

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXVII, p. 453, 23 septembre 1878.

théorie, pourquoi une telle explosion botanique a commencé et surtout comment, une fois commencée, elle a pu faire autrement qu'augmenter sans cesse.

On peut élever contre la doctrine du savant américain des objections qui paraissent décisives¹. Et d'abord, il faut rappeler qu'il existe des corps célestes, tels que la lune et les astéroïdes, qui sont absolument dépourvus d'atmosphère, tandis qu'il en est d'autres, comme Vénus et surtout Mercure, dont l'énorme enveloppe gazeuse n'est pas en rapport avec le volume.

Les études de Géologie comparée ont appris que, par le fait seul de l'évolution sidérale, l'atmosphère est peu à peu absorbée par le noyau solide de l'astre qu'elle entoure, au fur et à mesure du refroidissement spontané de celui-ci. C'est ainsi qu'après avoir eu la densité qu'on lui voit chez Mercure, puis l'épaisseur qu'elle a dans Vénus, elle acquiert les dimensions dont nous profitons sur la Terre, pour s'amincir ensuite comme elle a fait autour de Mars, en attendant qu'elle disparaisse absolument, ainsi que la Lune en offre l'exemple.

Il résulte de là que l'atmosphère est un des éléments essentiels de chaque astre et doit compter parmi ses roches originelles, au même titre que la mer et les assises pierreuses.

Quant à l'origine de l'acide carbonique, elle est certainement tout autre. Nous avons vu qu'on doit attribuer à ce gaz une source qui ne le donne que successivement. Mais rien ne justifie la supposition que cette source soit extraterrestre.

Passant du domaine de l'imagination pure sur le terrain de l'observation, nous devons, pour résoudre le problème qui nous occupe, chercher à préciser les conditions dans lesquelles se produisent des dégagements d'acide carbonique.

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXVII, p. 541, 7 octobre 1878.

Or, on reconnaît immédiatement que c'est surtout dans les contrées volcaniques que les dégagements d'acide carbonique sont très abondants : le gaz s'échappe avec force de certaines cavités, même au voisinage de volcans qualifiés d'*éteints*, ainsi qu'on l'observe près de Naples dans le célèbre *Grotto del Cane* et, en beaucoup plus petit à Royat (Puy-de-Dôme). Il s'accumule au fond des grottes, où par suite de sa densité plus forte que celle de l'air, il forme une couche où sont asphyxiés les animaux qui y pénètrent. Les éruptions volcaniques et les tremblements de terre sont ordinairement accompagnés d'émanations d'acide carbonique ; dans les Andes, et à Java où ces émanations sont très abondantes, elles amènent fréquemment la destruction des troupeaux. C'est à ces propriétés malfaisantes que ces émanations doivent leur nom de *mofettes* (par corruption du mot *mephiticus*).

Il est d'ailleurs très fréquent que l'acide carbonique arrive au jour, non pas gazeux, mais en dissolution dans des eaux qui bouillonnent alors et le laissent échapper.

Ces sources, comme les canaux qui laissent sortir le gaz, sont fréquemment placées sur les granits et par conséquent en dehors de toute relation avec les masses stratifiées. C'est donc des régions infragranitiques que procède le composé carboné.

Quant aux réactions chimiques en vertu desquelles l'acide carbonique peut se dégager dans les parties profondes de la Terre, elles doivent satisfaire, pour être dignes d'examen, à des conditions qui permettent d'éliminer dès l'abord un très grand nombre de suppositions.

Ainsi personne aujourd'hui n'admettra la théorie émise par M. Vézian ; « Le magma granitique de l'ère pluto-nienne, dit-il, tenait en dissolution, non seulement de l'eau, mais aussi de l'acide carbonique ; pendant les premiers temps géologiques, cet acide carbonique d'origine a alimenté les émanations formées en totalité ou en partie par ce gaz. A mesure que cette provision d'acide carbo-

nique, mise pour ainsi dire en réserve avec d'autres substances au-dessous de la première écorce terrestre, s'est épuisée, de nouvelles sources de ce gaz se sont formées. Maintenant, l'acide carbonique qui se dégage de la croûte du globe peut provenir de la combustion des matières carbonées dans les foyers volcaniques, mais probablement il résulte, en majeure partie, de la décomposition des carbonates. »

En réalité c'est à une réaction toute différente qu'il faut s'adresser : à la dissolution de la fonte de fer par des substances appropriées.

C'est à S. Cloëz qu'on doit la connaissance des produits qui prennent naissance quand de la fonte de fer est soumise à l'action dissolvante des acides hydrogénés. Ils consistent en carbures d'hydrogène qui par simple combustion se transforment en acide carbonique. Il faut à cet égard faire quelques emprunts au travail capital du savant chimiste¹.

Le traitement d'une fonte blanche, contenant 0,04 de carbone combiné et environ 0,06 de manganèse, par de l'acide chlorhydrique aqueux d'une densité égale à 1,12 donne lieu à la formation de produits hydrocarbonés gazeux et liquides, homologues de l'éthylène, absorbables par le brome, et pouvant se combiner facilement aussi avec l'acide chlorhydrique; on obtient en outre, dans ce traitement, des composés forméniques insolubles dans l'acide sulfurique et inattaquables par cet acide.

Allant plus loin, Cloëz a reconnu que si l'on traite par l'eau de la fonte de manganèse, il se produit, outre l'hydrogène, des gouttelettes que l'on peut condenser et recueillir. On constate de plus que le gaz formé brûle avec une flamme blanche éclairante, preuve évidente de la présence dans ce gaz d'une matière hydrocarbonée volatile.

¹ Cloëz, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXV, p. 1003, et t. LXXXVI, p. 1248.

Les produits carbonés liquides, formés par l'action de l'eau pure sur le ferromanganèse, sont de même nature que ceux fournis par la fonte blanche traitée par l'eau acidulée : une faible partie reste dans le ballon avec les oxydes ; on la sépare au moyen de l'alcool. La plus grande partie se condense dans les flacons laveurs contenant de l'eau ; un autre flacon laveur à moitié rempli d'alcool sert à retenir la portion la plus volatile des hydrocarbures.

Quant aux produits gazeux hydrocarbonés, formés par l'action de l'eau bouillante sur le ferromanganèse, on peut facilement constater leur existence de plusieurs manières : 1° en recueillant dans une cloche remplie de mercure le gaz débarrassé autant que possible des produits liquides ; après avoir desséché ce gaz au moyen de chlorure de calcium fondu, on le brûle dans l'eudiomètre avec une fois et demie son volume de gaz oxygène : on trouve dans le résidu un volume d'acide carbonique qui dépasse ordinairement le quart du volume du gaz combustible brûlé ; 2° au lieu de brûler le gaz par l'oxygène dans l'eudiomètre, on peut le mettre en contact avec de l'acide sulfurique concentré : on voit le volume du gaz se réduire considérablement et l'acide sulfurique brunir ; 3° en recueillant le gaz dans une éprouvette remplie d'eau et en introduisant ensuite un peu de brome, on observe également une diminution de volume, due à l'absorption du gaz carboné par le brome.

« En résumé, dit Cloëz, mes nouvelles expériences démontrent que l'eau seule, en agissant à chaud sur un alliage carboné de manganèse et de fer, cède son oxygène aux métaux pour former d'abord des protoxydes qui passent ultérieurement par l'action de l'air à un degré supérieur d'oxydation. Quant à l'hydrogène, une partie se dégage à l'état de liberté, le reste se combine avec le carbone pour produire des hydrocarbures analogues à ceux qu'on trouve dans le sol et qu'on exploite sous le nom de pétrole. »

Pour que les faits intéressants qui précèdent puissent nous conduire à la solution cherchée, il faut maintenant démontrer l'existence de véritable fonte dans les régions profondes de notre globe.

On sait que, depuis longtemps, beaucoup d'observations ont conduit à faire pressentir que la Terre renferme un noyau de substances métalliques parmi lesquelles le fer doit prédominer.

Un premier argument favorable à cette opinion est tiré de la densité de la Terre, si notablement supérieure à celle que permettraient de lui assigner les roches que peuvent atteindre nos moyens d'investigation. Cette densité (5,5) serait naturelle pour un globe dont le centre serait de fer massif.

Un deuxième ordre de faits, concordant avec le précédent, est relatif au magnétisme terrestre. Chladni en expliquait les phénomènes par la supposition d'une masse centrale de fer métallique ; mais, depuis lors, on a généralement renoncé à cette manière de voir pour se ranger à la belle théorie d'Ampère. Cependant, il faut bien remarquer que les raisons dont on s'est prévalu contre le physicien de Wittenberg ne sont point suffisantes. Il semblait que la haute température des régions profondes du globe fût incompatible avec la manifestation des phénomènes magnétiques. Or, par de très intéressantes expériences, M. Trève a montré comment on peut aimer la fonte alors qu'elle est en pleine fusion ; nous pensons que, relativement au magnétisme terrestre, les idées de Chladni et celles d'Ampère devront être simultanément adoptées et combinées entre elles.

Enfin une série d'arguments encore plus probants en faveur de l'existence d'un noyau métallique au centre du globe, est fournie par la découverte du fer libre dans certaines roches profondes.

Pendant longtemps on ne l'y a connu qu'à l'état de traces difficiles à constater. C'est ainsi qu'en 1852

M. Andrews publiait une méthode au moyen de laquelle il avait reconnu l'existence du fer libre dans les roches volcaniques de la Chaussée des Géants, en Irlande, et de plusieurs autres localités. Plus tard, par un procédé différent, M. Sterry Hunt a trouvé du fer libre dans certaines roches des États-Unis. Grâce à un troisième mode opératoire, nous avons nous-même décelé le même métal dans plusieurs basaltes, dans les dolérites et dans d'autres roches volcaniques. De son côté, M. de Engelhardt assure que le platine natif est parfois accompagné de fer libre provenant évidemment de très grandes profondeurs, et l'on sait que, dans l'Oural, le platine possède souvent des propriétés magnétiques, qui lui sont communiquées par les 9 ou 10 centièmes de fer auxquels il est allié.

Aujourd'hui, on possède des observations beaucoup plus concluantes et que nous devons rappeler en peu de mots.

On peut voir dans la galerie de Géologie du Muséum une énorme masse noire arrondie : c'est le modèle, en plâtre peint, d'un bloc de fer métallique du poids de 20 000 kilogrammes trouvé, en 1870, par Nordenskiöld, à Ovisak, dans l'île de Disko, sur la côte occidentale du Groënland. Elle y était en compagnie de deux autres masses pesant la moitié et le quart de son poids, et d'une douzaine de nodules beaucoup plus petits.

Frappé de l'intérêt de ces blocs métalliques gisant au milieu du basalte, M. Nordenskiöld conçut aussitôt la pensée de les acquérir à la science ; mais n'ayant pas à sa disposition des moyens d'action suffisamment énergiques, il dut retourner à Stockholm pour se les procurer.

Le Groënland étant une possession danoise, il fallut obtenir de Copenhague l'autorisation de faire enlever les blocs et assurer à son Musée le tiers de la prise. Cette formalité accomplie, la canonnière à vapeur *Ingegerd* et le brick *Gladon* furent armés spécialement pour cette expé-

dition toute scientifique, et placés sous le commandement de M. von Otter.

Des difficultés sans nombre semblaient s'opposer à l'entreprise. Les Groënlandais, si intrépides marins, considèrent le rivage d'Ovifak comme inabordable, même en été, par suite de la houle presque perpétuelle qui y règne. En effet, la côte d'Ovifak, sur laquelle se trouvaient les fers, présente, sur une longueur de 30 mètres environ, une grève couverte d'énormes galets derrière laquelle s'élève la paroi verticale de roches basaltiques d'une hauteur énorme, et dont le pied est recouvert par un épais talus d'éboulis. Les galets continuent en pente douce sous la mer jusqu'à une grande distance du rivage.

Grâce à l'habileté du chef de l'expédition et à une embellie inespérée, les difficultés furent heureusement surmontées ; les trois blocs furent capturés, et on laissa à Copenhague celui de dimension moyenne.

On s'empessa d'analyser les fers qui se présentaient d'une si étrange façon. Plusieurs chimistes suédois, et, entre autres, M. Nordenskiöld, y constatèrent la présence du nickel et du cobalt, et conclurent, comme le firent plus récemment M. Wölher et d'autres, à leur origine extra-terrestre.

Or, d'après les analyses publiées par M. Daubrée, les roches à fer natif d'Ovifak appartiennent au moins à trois types dont on peut voir les échantillons au Muséum. Le premier consiste en une roche noirâtre rappelant, pour l'aspect, certaines fontes graphitiques, et prenant très bien le poli ; sa cassure est lamelleuse sans que les faces du clivage permettent de reconnaître une disposition régulière et un système cristallin. Le deuxième type offre aussi une couleur et un éclat qui rappellent le fer ordinaire, mais la roche soumise à la pulvérisation, se sépare en deux portions très distinctes, dont l'une se réduit en poussière fine, tandis que l'autre résiste et s'étire en minces lamelles. Enfin, dans le troisième type, la

substance métallique, au lieu d'être continue, n'apparaît qu'en globules et en grains dans une masse lithoïde. Cette dernière, d'un vert très foncé et de nature silicatée, forme la plus grande partie de la roche.

Ces diverses roches se distinguent également par leur aspect et par leur composition des types jusqu'ici connus de météorites. A ce dernier point de vue, le caractère le plus saillant consiste en ce que les fers d'Ovifak contiennent une forte proportion de carbone combiné, circonstance qui ne se présente pas chez les fers météoriques.

D'un autre côté on ne peut se refuser de reconnaître que ces masses offrent beaucoup de ressemblance avec plusieurs roches terrestres déjà connues. Leur état cristallin et la présence du fer oxydé porteraient à les rapprocher des basaltes et des dolérites. Même, l'existence du fer natif, qui tout d'abord semble une différence profonde, peut, au contraire, d'après ce qui a été dit tout à l'heure, être invoquée comme un lien de parenté.

Ceci posé, on vient de voir que la plaged'Ovyfak est fermée par une haute falaise de roches basaltiques. Celles-ci renferment simplement du fer métallique en quantité extraordinaire, et qui s'y présente sous la forme de grains arrondis de toutes grosseurs avec la même composition chimique que les gros blocs. De plus, on a noté que des fragments de la même roche basaltique étaient encore adhérents, comme des débris de croûte, aux grosses masses de fer isolées et même empâtées dans leur intérieur, comme on le voit dans un échantillon conservé à Stockholm.

Pour expliquer ce gisement si singulier dans l'hypothèse d'une origine cosmique, on a été conduit à supposer que la chute des météorites avait eu lieu précisément à l'époque où le basalte faisait éruption à l'état pâteux. On conviendra que cette coïncidence, sans être impossible, serait bien étrange, et l'on peut ajouter qu'une nouvelle étude des localités, faite surtout par M. Steenstrup, de Copenhague, en a démontré l'impossibilité. La forme

même des grenailles s'y refuse tout à fait : beaucoup sont lenticulaires, et l'on en cite une qui, sous une épaisseur de quelques centimètres, a plusieurs mètres de longueur. Rien, parmi les pierres tombées du ciel, ne rappelle cette disposition, analogue au contraire à celle des minerais empâtés dans les roches éruptives. C'est surtout l'examen des basaltes pétris de grenaille, dont on doit la découverte, dans le détroit de Waigatz, à M. Steenstrup, qui permet d'affirmer que le métal est réellement d'origine terrestre.

Étant démontré maintenant que les profondeurs de notre globe renferment de la véritable fonte, il faut remarquer que la réaction étudiée par Cloëz, et dont les produits sont d'abord des carbures d'hydrogène, puis de l'acide carbonique, peut s'y développer. Ce qu'il faut pour cela, c'est que des liquides de composition convenable, parviennent au contact de la fonte.

Quant à la composition du liquide d'infiltration, il est évident que nous n'avons pas les éléments nécessaires pour la déterminer d'une manière même approximative. Mais il est bien évident, surtout depuis que la fabrication de l'acétylène est devenue courante, qu'à la température des régions infragranitiques, l'eau pure possède une énergie chimique assez considérable pour déterminer la réaction qui nous occupe.

Quoi qu'il en soit, nous reconnaissons à n'en pas douter que le globe contient dans ses propres profondeurs tout ce qu'il faut pour expliquer l'origine de l'acide carbonique atmosphérique.

Nous n'avons pas, à propos de l'atmosphère, à insister comme pour la mer sur l'existence de courants réguliers se traduisant par des œuvres géologiques spéciales ; et la production du banc de Terre-Neuve n'est que très imparfaitement rappelée par les atterrissements éoliens des parages du Cap Vert.

En échange, nous avons à considérer tout un ordre de

faits auxquels la mer était tout à fait étrangère. Il s'agit des variations des pressions et des changements qui peuvent en résulter au point de vue géologique.

On sait que les vicissitudes de la pression atmosphérique se traduisent immédiatement par les changements d'allure des volcans continus comme le Stromboli. C'est au point que les pêcheurs qui naviguent constamment aux alentours tirent des pronostics météorologiques du rapprochement plus ou moins grand, dans un temps donné, des éclairs (improprement qualifiés de flammes) de ce volcan.

De même on a pensé que les variations du baromètre ont leur contre-coup dans les accidents des mines de houille, en provoquant plus ou moins d'après leur valeur les dégagements du grisou. Il se pourrait aussi que les dégagements d'acide carbonique à la Grotte du Chien, comme dans les sources gazeuses, en fussent influencés.

8 — L'ÊTRE VIVANT

Dans le grand organisme terrestre, l'ensemble des êtres vivants, animaux et végétaux, se comporte comme un simple organe, collaborant, par une fonction très précisément définie, à la conservation de l'équilibre général.

Nous pouvons facilement retrouver des circonstances où l'être vivant détruit des roches constituées et réalise par conséquent une véritable *dénudation biologique*, et il en est un nombre considérable où il édifie des roches nouvelles, ce qui produit la *sédimentation biologique*. Ce sont là des traits symétriques de ceux que nous avons rencontrés dans l'histoire de bien d'autres appareils de la physiologie terrestre. Après les avoir décrits, il nous restera à signaler quelques particularités importantes appartenant en propre aux êtres vivants.

La dénudation biologique, c'est-à-dire l'attaque des

roches par les êtres vivants, prend suivant les cas des caractères très nettement différents et, dans cette série, il semble tout naturel de donner le pas à la plante sur l'animal. On la voit en effet de tous côtés, désagrégér même les masses les plus compactes et les plus dures et c'est ainsi qu'elle contribue si efficacement à la constitution de la terre végétale. Alors, ce sont les plantes les plus humbles qui paraissent jouer le rôle le plus important : les lichens s'établissent sur des roches où aucun autre être ne pourrait vivre et contribuent ainsi à désagrégér les plus hautes cimes de montagnes, pourvu que la neige ne les recouvre pas, comme les rochers les plus exposés à l'embrun sur les côtes, pourvu que la lame n'y déferle pas.

Des végétaux supérieurs partagent cette tâche et les arbres, en poussant leurs racines dans les fissures des roches, contribuent très fréquemment à les désagrégér. Il arrive même qu'elles perforent la roche vive et j'ai naguère analysé un fait de ce genre remarquable par sa netteté¹.

C'est dans la même série qu'il faut citer l'activité des racines sur les roches calcaires et la sculpture de plaques de marbre enfouies dans la terre végétale par les racines qui poussent à leur contact. Il y a à ce sujet des expériences classiques.

Les racines des végétaux supérieurs peuvent aussi exercer leur pouvoir de dénudation, en dissolvant certains éléments du sol qu'on devrait croire pourvus d'une très grande stabilité. Il y a bien longtemps maintenant qu'on a signalé cette influence relativement aux sables et aux argiles qui sont privés, par ce mécanisme biologique, de l'oxyde de fer qui les teignait en rouge. Autour de Paris, on en voit des exemples fréquents et principalement dans le diluvium rouge et dans les marnes ocracées qui servent

1. *Comptes rendus* du 11 octobre 1875.

de gangues aux meulières. Le fait est d'autant plus intéressant qu'il peut jouer son rôle dans la genèse de certaines variétés de minerais de fer.

Bien des animaux sont également lithophages et il sera très utile de se le rappeler pour se rendre compte plus tard de maints caractères des roches de tous les âges.

Déjà, dans les régions exondées, il faut compter avec des animaux fouisseurs, depuis les lapins et les taupes jusqu'aux vers de terre, dont le rôle géologique a été signalé par Darwin, en passant par des multitudes de larves. Des oiseaux mêmes sont dans le nombre et les hirondelles arrivent à cribler de cavités certains escarpements.

Des mollusques terrestres en font autant et parfois sur une très vaste échelle.

J'ai reçu, de M. Bretonnière, pour la collection de Géologie du Muséum, où doivent figurer tous les procédés employés par la nature pour désagréger ou dissoudre les roches, de curieux échantillons de calcaire provenant des environs de Constantine et qui sont très profondément perforés par des escargots. De semblables perforations se voient dans toutes les masses calcaires qui supportent la ville et spécialement dans le Sidi Meid, qui est séparé de la cité par la déchirure où coule le Rumel et qui, comme on le sait, est profonde de 200 mètres.

Les perforations dont il s'agit, parfois isolées, sont le plus souvent groupées et même en très grand nombre. La roche n'est jamais attaquée en-dessus, mais par dessous ou latéralement ; d'après les observateurs les plus attentifs, lorsque l'une des assises de la montagne est séparée de l'assise inférieure par un vide occupé autrefois par une roche plus friable, on y trouve généralement un certain nombre de ces trous ou alvéoles creusés verticalement dans l'assise supérieure et par conséquent ayant leur ouverture en bas. Dans ces abris sont réunis des escargots, parfois en colonies fort nombreuses et qui s'abandonnent alors à leur sommeil hivernal.

Peu de temps après cet envoi, il m'est parvenu de très curieux spécimens tout à fait comparables, et qui ont été recueillis, les uns par M. Harlé, à Salies-du-Sarlat, et d'autres par M. Paul Petit, professeur au Lycée de Foix, dans plusieurs localités du département de l'Ariège.

La route de Foix au Mas d'Azil, par Vernayoul et Baulon, suit d'une manière régulière la chaîne du Plantaurel, à quelques centaines de mètres des collines : aux environs de Baulon, les roches perforées, qui sont des calcaires lithographiques, sont extrêmement nombreuses dans tous les bosquets de broussailles qui avoisinent la route, et, à plusieurs endroits, ces pierres servent actuellement à l'empierrement ou aux travaux de construction.

On retrouve les mêmes roches perforées au delà d'Aigues-Juntas. Un peu au delà de Baulon, on trouve l'embranchement de la route qui conduit à la Bastide de Seron et dans quelques petits vallons des calcaires lithographiques formant des blocs assez volumineux (quelques mètres cubes) au milieu des prés et des broussailles, dans une situation très favorable à la multiplication des mollusques. M. Petit a rencontré en ce point des perforations multiples avec communications entre elles, et c'est ce que M. Harlé a vu de son côté à Salies-du-Sarlat.

Comme pour les escargots algériens, les cavités sont ici encore creusées en-dessous d'une saillie, et en général l'ouverture est à un niveau inférieur à celui du sommet de la cavité. En outre, ici, comme en Algérie, les perforations sont en général de la grosseur du pouce.

Mais pour ce dernier point, il y a lieu d'ajouter que la série dont le Muséum est redevable à M. Petit, contient des fragments provenant de Saint-Sauveur de Foix, et dont les perforations, beaucoup plus exigües, semblent être l'œuvre de très petits mollusques qui les recouvrent en grand nombre. Ce sont des Hélix extrêmement jeunes et indéterminables spécifiquement.

Il convient de remarquer qu'en ce cas, les perforations

sont bien éloignées d'être aussi exactement coordonnées quant à leur direction, quant à leur forme et quant à leur dimension, d'après les coquilles perforantes.

On voit par ces détails, que les exemples de perforations de calcaire ne sont pas rares, et l'on peut ajouter qu'elles ont été signalées déjà par Constant Prévost, récemment par le savant marquis de Gregorio (de Palerme), et par une série d'autres observateurs.

Il y a donc d'autant plus lieu de rechercher par quel mécanisme ces curieux accidents ont pu prendre naissance. Or, il suffit d'un coup d'œil sur les excavations pour être absolument persuadé qu'elles ont été creusées par les escargots eux-mêmes ; il n'y a là-dessus aucune divergence d'opinion et M. Bretonnière, observateur distingué qui a étudié le sujet d'une façon spéciale, s'exprimait à cet égard de la façon suivante : « Si l'on remarque, dit-il, que la pierre est formée de carbonate de chaux, comme la coquille du limaçon, on incline à penser que l'animal a pu avoir un autre intérêt à creuser les alvéoles que celui de se créer un abri pendant son sommeil hibernant. Pourquoi la nature ne lui aurait-elle pas donné le moyen, à l'aide d'un acide contenu dans sa bave, de décomposer le calcaire pour s'en approprier la chaux ? »

Ce raisonnement peut être séduisant, mais il ne résiste pas à l'examen. D'abord, cette circonstance que la coquille est calcaire comme la roche attaquée, devrait faire réfléchir avant de supposer que l'animal peut vivre dans un milieu acide et il y aurait lieu de s'étonner que la coquille ne fût pas attaquée en même temps que le calcaire.

D'un autre côté, le volume des trous représente un grand nombre de fois celui de la coquille, et, comme les escargots non-perforants ont un tégument pierreux tout aussi épais que ceux qui nous occupent, on ne voit pas de quelle utilité peut être cet énorme supplément.

Enfin, une expérience des plus simples m'a montré

que la bave du limaçon ne décompose pas le calcaire et que même elle n'agit pas sensiblement sur le papier de tournesol bleu à la surface duquel on laisse ramper l'animal.

J'ai pu faire ces expériences, non pas avec un limaçon quelconque, mais avec un escargot bien authentiquement lithophage, car il faisait partie d'un des échantillons parvenus au Muséum ; recueilli en Algérie au mois d'octobre pendant son sommeil, il est venu en France, a été présenté à l'Académie des sciences, puis a été catalogué au Muséum, sans que ces aventures, au moins inusitées dans la vie des gastéropodes, soient parvenues à le réveiller. C'est seulement dans le cours du mois de mai suivant, pendant qu'un dessinateur prenait un croquis du spécimen, que l'animal sortant de son engourdissement a tiré ses cornes, et, sans doute, il aurait disparu, si on l'avait laissé faire. Malheureusement pour lui, il pouvait nous procurer des renseignements utiles et j'ai étudié sur lui, non seulement la réaction chimique de la bave, mais d'autres particularités.

Bien des animaux marins réalisent aussi la lithophagie et il y aura intérêt à se le rappeler quand nous voudrons reconnaître certains faciès anciens. Ainsi des annélides marins font dans le sable des perforations parfois très caractéristiques.

Beaucoup de mollusques percent également les roches de façon à se préparer des logettes où ils sont à l'abri de la dessiccation pendant la marée basse et qui les protège aussi contre diverses causes de destruction.

De semblables perforations sont abondantes sur certaines de nos côtes. On peut rappeler que leur présence dans les pierres entrant dans la construction du temple de Jupiter Sérapis à Pouzzolles ont procuré des notions quant à la mobilité verticale de la surface terrestre en ce pays.

Pour les mollusques marins, l'hypothèse d'une perforation chimique a été proposée à diverses reprises au sujet

des gastrochènes, des lithodomes, des saxicaves et des pétricoles. Elle fut émise dès 1763 par De La Faille et acceptée par plusieurs naturalistes tels que Deshayes. « Jusqu'à présent, dit à cette occasion le savant D^r Paul Fischer dans son incomparable *Manuel de Conchyliologie* (p. 917), on n'a pas démontré la présence de l'acide destiné à dissoudre le calcaire. Les bords des excavations et des entailles que produisent les mollusques sur d'autres coquilles perforantes lorsqu'ils les rencontrent sont tellement nets, qu'il est difficile de croire à l'existence d'un acide, qui, dans ce cas, aurait aussi plus ou moins atteint le test de l'animal perforant ».

Mais la question est certainement plus complexe car les animaux lithophages marins ne se bornent pas à attaquer des roches calcaires : on voit des pholades et d'autres mollusques, on voit aussi des oursins tels que notre vulgaire *Echinus lividus* attaquer le gneiss, le micaschiste et le granit lui-même.

Aussi, une autre manière de voir a-t-elle été invoquée dès 1681 par Buonanni. Elle consiste à attribuer les perforations à une action mécanique exercée par le test même de la coquille. En 1773, Leendert-Bomme observa directement des animaux de pholade et les vit tourner dans leurs trous par un mouvement de va-et-vient. « Cela prouve à l'évidence, dit-il, que l'animal perce la pierre par le bout le plus épais de sa coquille arrangée en lime et qu'en la limant, il la réduit en poussière ».

Comme le rappelle le D^r Fischer, le défenseur le plus ardent et le plus convaincu de l'action mécanique de la coquille fut F. Cailliaud, de Nantes. Ce patient naturaliste a commencé par prouver qu'avec la coquille seule de la pholade, on peut creuser un trou dans le calcaire et même dans le gneiss, à la condition d'opérer sous l'eau ; ainsi, il a suffi d'une heure et demie pour pratiquer une excavation de 18 millimètres de profondeur avec une pholade tenue à la main. D'autre part, après avoir fixé des

valves de taret au bout d'une baguette, Cailliaud a pu percer le bois sans difficulté. Ses expériences sur les animaux sont très intéressantes ; après avoir pratiqué quelques trous dans le gneiss il y a introduit des pholades qui les ont approfondis. Les mollusques, dans leur travail, contractent leur siphon et écartent leurs valves ; le pied se fixe comme une ventouse au fond du trou et attire les valves à lui, suivant qu'il est placé à droite ou à gauche ; ou bien le muscle adducteur des valves, en se contractant, détermine un frottement des épines des valves sur les parois des cavités.

Cependant, Cailliaud, après avoir fourni ces arguments en faveur de la perforation mécanique par les valves, n'admet ce procédé que pour les tarets et les pholades dont la partie antérieure du test peut être comparée à une lime, comme le faisait déjà Leendert-Bomme ; il reconnaît qu'il est impossible d'expliquer ainsi la perforation par par les pétricoles, les lithodomes, les gastrochènes, etc., dont la coquille est lisse ou simplement rugueuse, parfois revêtue d'un épiderme épais ; dans ce cas, où il comprendrait nécessairement nos escargots de Constantine, il invoque à son aide l'intervention d'une action dissolvante.

Plus récemment que les travaux du savant nantais, Robertson a observé directement des pholades travaillant dans les blocs de craie. Il les a vues tourner d'un côté et de l'autre, mais sans jamais faire plus d'un demi-tour et cessant d'ailleurs de travailler dès que la cavité est assez profonde pour les abriter. La craie en poudre, résidu du creusement, est rejetée par l'un des siphons, l'espace compris entre la coquille et les parois du trou restant rempli d'une fine boue crayeuse.

Relativement à nos escargots algériens, il est bien clair que la coquille ne creuse pas directement le rocher. Cailliaud, on vient de le voir, reconnaît la nécessité du travail *sous l'eau* pour que la perforation mécanique soit possible et d'un autre côté le bord de la coquille des limaçons

n'a rien de rugueux qui puisse la faire comparer à une lime et même elle est bordée d'un épiderme très charnu.

Pour les animaux terrestres et dépourvus de rugosités, il ne reste donc qu'à chercher si la théorie ingénieuse proposé en 1848 par Hancock leur est applicable et c'est ce que nous allons tenter.

Comme on le sait, Hancock a découvert à la surface du pied des tarets et des pholades une quantité de petits points brillants réfractant la lumière, cristallins, réunis par groupes, résistant à l'action de l'acide acétique et de l'acide azotique qui ne les attaquent que partiellement et qu'en conséquence on est en droit de considérer comme étant de nature siliceuse.

Les mêmes particules solides se retrouvent à la partie antérieure du manteau chez les gastrochènes, et à la surface du pied et des bords du manteau chez les patelles qui pratiquent sur les rochers des excavations particulières. Hancock conclut de ses observations que le pied et la partie antérieure du manteau des pélécy-podes perforants sont armés de petits instruments d'une puissance mécanique remarquable : on peut en effet comparer ces parties à du papier d'émeri. Les résidus de la perforation du bois qu'on trouve dans le tube digestif des tarets montrent une certaine quantité de corpuscules cristallins des téguments qui ont été détachés durant le travail.

En examinant au point de vue de sa théorie les perforations de quelques mollusques à coquilles lisses comme les saxicaves et les gastrochènes, Hancock a trouvé au fond de leurs trous un fin sédiment calcaire qui se dépose aussi sur leurs valves, comme sur celles des lithodomes. Ce sédiment fait effervescence avec les acides ; il n'aurait pas dû échapper à l'action chimique précédemment invoquée comme agent de la perforation de la roche ; par conséquent, ce sédiment provient de la friction mécanique exercée sur le rocher par le manteau ou par le pied de l'animal.

C'est en partant de ces prémisses que j'ai soumis à l'expérience suivante l'escargot réveillé à Paris.

Après avoir tué l'animal par l'ébullition dans l'eau, je l'ai extrait de sa coquille et immergé dans l'acide sulfurique ordinaire. Toute la substance animale a été rapidement carbonisée et dissoute. Des lavages à l'eau, répétés à plusieurs reprises, ont permis d'isoler un résidu insoluble assez abondant qui a été soumis à l'observation microscopique.

Ce résidu s'est montré formé en partie par des grains irréguliers, très durs, évidemment corrodés en partie, dont beaucoup sont très actifs sur la lumière polarisée et où l'analyse n'a décelé que de la silice.

Bien que je ne puisse dire dans quelle région du corps de l'escargot ces grains pierreux et hyalins avaient leur siège, il est permis de supposer d'après les observations de Hancock qu'ils constituaient, dans le pied, un appareil d'usure analogue à celui des mollusques lithophages marins.

Comme agent de sédimentation, l'être vivant se comporte de manières fort différentes suivant les cas. Tout d'abord, il élabore physiologiquement et par le fait de sa vie une matière minérale appelée à remplir une fonction dans le maintien de l'équilibre général.

C'est ainsi, par exemple, qu'en raison de la fonction chlorophyllienne les plantes fabriquent de l'oxygène dont la provision toujours renouvelée est mise à profit dans une longue série de circonstances, et entre autres dans la respiration des animaux, et l'oxydation d'une foule de matériaux.

Parfois, cette genèse de l'oxygène par les plantes prend une forme encore bien plus nettement géologique puisqu'on peut lui rattacher directement l'origine de massifs rocheux pouvant atteindre parfois un volume très notable.

On voit, par exemple, des algues procéder aussi à

l'édification de massifs énormes de travertins, soit calcaires comme dans le pays de Vaud, où je les ai étudiés, et bien ailleurs, soit siliceux comme dans le bassin même très chaud de certains geysers des États-Unis.

Des observations du plus haut intérêt rattachent la genèse du phosphate de chaux à une action biologique : des microbes en sont parfois les artisans.

M. Armand Gauthier a signalé dans ce genre, l'intervention de micro-organismes dans la production de phosphates de chaux qui incrustent certaines cavernes aux environs de Montpellier.

Ehrenberg était d'avis que des algues, *Galionella ferruginea*, peuvent constituer des minerais de fer par l'accumulation de leurs carapaces.

Il est très important de constater que des substances d'apparence très stable comme les argiles peuvent être décomposées avec mise en liberté de silice par des organismes inférieurs. Des expériences, faites avec la plus grande précision, ont consisté¹ à provoquer la multiplication des diatomées dans de l'eau non silicifère et contenant de l'argile en suspension. Les radiolaires et les spongiaires jouissent de la même faculté et les conséquences de ces faits seront extrêmement importantes pour l'interprétation d'une foule d'observations géologiques.

Par exemple, on a pensé à la suite de MM. Murray et Irvine que cette réaction est la conséquence du développement primitif de sulfates par les êtres vivants et que ces sulfates décomposent ensuite l'argile. Peut-être ces faits pourraient-ils fournir l'indication d'une recherche à tenter sur l'origine de la latérite, produit qu'on doit regarder comme complémentaire de la silice dans la décomposition des argiles.

On ne saurait dans cette série omettre le rôle si inté-

¹ *Proceedings of the royal Society of Edinburgh*, t. XVIII, p. 229 et 251 (1890-1891).

ressant de certains microbes dans la production des eaux minérales sulfurées.

Des algues étudiés à la fois par les botanistes et par les chimistes et parmi lesquels il faut citer spécialement d'après M. Van Tieghem : les *Beggiatoa*, les *Chromates* les *Thiocystes* et bien d'autres, jouissent de la propriété de réduire le sulfate de soude, le sulfate de chaux et d'autres sulfates solubles et d'en fabriquer des sulfures, d'en isoler même le soufre libre.

C'est par un tout autre mécanisme que les êtres organisés arrivent dans certains cas à constituer des massifs rocheux par l'accumulation *post mortem* de leurs dépouilles.

Pour les plantes nous avons à citer dans cette voie le grand phénomène du tourbage, qui nous montre des couches de combustible résultant de l'accumulation des portions mortes de plantes qui continuent à avoir du reste des parties florissantes.

Ailleurs, nous voyons les courants aqueux réunir des débris végétaux, feuilles ou autres qui, enfouis dans les vases lacustres ou marines, subissent des transformations qui les rapprochent de la constitution des fossiles. Les diatomées constituent aussi, parfois sous la terre végétale, comme à Berlin et dans divers points de notre Auvergne, des lits silicieux remarquables.

Pour les animaux, nous avons des faits symétriques. Des huîtres et d'autres mollusques et surtout des madrépores constituent dans la mer des bancs et des récifs qui peuvent rappeler les tourbières par l'association qu'on y voit d'un soubassement rocheux d'origine biologique et d'une zone actuellement vivante qui le recouvre. On sait que dans les océans tropicaux les formations madréporiques atteignent de si grandes dimensions que Michelet a pu légitimement donner à leurs artisans le nom caractéristique de *Constructeurs de continents*.

D'un autre côté, les accumulations de dépouilles ani-

males font aussi par place des couches entières, soit dans les eaux marines, où des coquilles ou des os charriés sont souvent réunis en grand nombre sur le même point, soit sur les surfaces baignées par des eaux fluviales, lacustres, ou lagunaires et où des ossements d'animaux terrestres se sont entassés comme à Pikermi, à Sansan et ailleurs.

Parfois la précipitation à l'embouchure des rivières, par l'action de l'eau douce sur l'eau marine, de milliards de tests de foraminifères amène l'ensablement rapide des embouchures et des ports de façon à donner une idée spécialement probante de l'activité biologique dans ces points.

Enfin il est utile, à cause des conséquences géologiques, de constater que l'accumulation des déjections animales, ou guano, peut prendre de grandes dimensions et jeter du jour sur des genèses de roches anciennes.

On n'aurait d'ailleurs pas tiré de l'examen de l'être vivant toute la lumière qu'on est en droit d'en attendre, si l'on n'insistait sur les particularités de la localisation des diverses formes vivantes en des points nettement différents.

Il n'y aura qu'à traduire ces résultats pour reconnaître les conditions de production d'anciens dépôts: et, à cause de la délicatesse des productions biologiques, les résultats seront spécialement précis.

Tout d'abord nous savons distinguer les êtres terrestres des êtres marins et des êtres lacustres; autant de faciès sont à en déduire, et il n'y a pas lieu d'y insister; d'un autre côté nous savons que les végétaux comme les animaux sont distribués en conséquence de la météorologie de chaque point, de son climat pour tout résumer en un mot.

C'est Buffon qui, le premier, a reconnu que les êtres vivants affectent une distribution géographique déterminée — de sorte que chaque espèce occupe une area distincte.

« Il n'y a peut-être aucun animal dont l'espèce soit généralement répandue sur toute la surface de la Terre : chacun a son pays, sa patrie naturelle dans laquelle chacun est retenu par nécessité physique ; chacun est fils de la terre qu'il habite et c'est dans ce sens qu'on doit dire que tel ou tel animal est originaire de tel ou tel *climat* (*Les époques de la Nature*).

Parmi les contre-coups biologiques des climats, on peut noter la netteté de la limite Nord des arbres, aussi bien en Amérique que dans l'ancien Monde.

C'est vers le 70° lat. N. que passe cette limite avec une forte inflexion au Sud dans la région canadienne.

Le caractère de la végétation des zones de latitude a été esquissé par Humboldt (*Tableau de la Nature*). Fabricius et Linné ont divisé le globe en provinces entomologiques climatériques. Forbes a construit une carte de zones homoïzoïques ou zones de vie marine.

Il est d'observation courante que les types organiques se modifient complètement lorsqu'on se dirige du Nord au Sud et réciproquement, dans le sens d'un méridien quelconque.

Aucune faune, d'après d'Archiac, ne se répète ni n'est continue non plus dans le sens des parallèles, quoique en général plus étendue que du Nord au Sud. Variété et succession graduelle dans un sens et dans l'autre, telle paraît être à cet égard la loi de la Nature.

C'est à la suite des grandes explorations scientifiques en mer profonde, que la fonction biologique s'est révélée avec l'ampleur qui lui appartient en effet. Jusque-là on avait admis que les profondeurs de la mer lui étaient absolument interdites et les excellentes raisons abondaient pour démontrer qu'en dehors de quelques centaines de mètres, le milieu océanique, par sa pression qui en chassait tous les gaz, par son obscurité absolue, par son immobilité, se refusait à l'entretien d'aucune forme vivante. Forbes en 1840 a publié un résumé synthétique de ce

qu'on croyait savoir sur la distribution bathymétrique des êtres marins. On y voit au-dessous de la région tout à fait littorale, limitée inférieurement par le niveau de la marée basse, trois zones qu'il qualifie de zone laminaire (30 mètres), zone coralline (60 mètres) et zone des profondeurs (de 200 à 600 mètres). Au-dessous vient « l'abîme » que l'auteur qualifie de *désert*.

Les résultats des croisières scientifiques ont été bien différents et, jusqu'à plus de 8 000 mètres de profondeur, on a vu la vie très active dans les abîmes de la mer. M. Pourtalès a publié un tableau de la distribution bathymétrique des sédiments vivants où l'on voit à chaque profondeur correspondre la prédominance des formes organiques spéciales et on admet en général que la composition minéralogique des sédiments varie aussi en même temps.

Rappelons seulement d'un mot que les vases calcaires à globigérines se développent à des profondeurs de 500 à 5 300 mètres, sauf dans les mers fermées où on ne les a pas rencontrées. Les tests de foraminifères y sont si nombreux que M. Schlumberger a compté dans des produits de sondage du *Travailleur* jusqu'à 116 000 coquilles par centimètre cube, et que l'accumulation de ces débris, par exemple au-dessous des courants réguliers chauds, comme le gulf-stream et le courant japonais, a pu élever le fond sous-marin d'une quantité suffisante pour que des masses de polypiers coralligènes s'y soient établis.

Les vases siliceuses se prolongent jusqu'à 8 000 mètres de fond; elles se scindent souvent en vases à diatomées et vases à radiolaires, celles-ci étant les plus profondes. On y trouve des éponges siliceuses. A 4 800 mètres, d'après Wiville Thompson, « les *Cladorhiza* forment au fond des mers d'épais buissons qui, dans certaines parties, recouvrent des espaces considérables, comme la bruyère revêt une lande ».

DEUXIÈME PARTIE

CONSTATATION AUX DIVERSES ÉPOQUES DES GRANDS TRAITES GÉOLOGIQUES ACTUELS

Après avoir précisé, dans une mesure suffisamment large, les différentes fonctions actuellement en cours dans l'ensemble de la physiologie tellurique, nous devons nous occuper maintenant de rechercher par le témoignage des roches, si les lois générales de ces phénomènes se sont continuées à travers le temps, s'il y a des époques de la vie planétaire qui soient caractérisées soit par l'absence de certaines de ces fonctions, soit par la manifestation de fonctions particulières.

Pour que les comparaisons soient fructueuses, il est indispensable de dégager d'abord des sections correspondantes à celles qui se sont imposées pour l'étude des phénomènes en cours à l'époque actuelle, — quitte à ajouter quelques divisions, si le besoin s'en fait sentir pour des sujets qui n'auraient pas leurs homologues à présent. C'est dire qu'étant données les conclusions de notre première partie, nous aurons successivement à rechercher au travers des temps écoulés les manifestations des sept fonctions physiologiques que nous avons distinguées.

Comme on va le voir, le résultat de cette étude sera uniformément qu'à tous les moments de la vie du globe, les appareils dont il s'agit ont fonctionné : ce qui revient à dire qu'à tous les moments, l'état d'équilibre résultant des harmonies naturelles a été le même ; et cela fait surgir la question fructueuse de l'utilité d'une substitution continue de moyens équivalents les uns aux autres, là où la persistance d'un état uniforme pourrait nous sembler suffire. C'est un des plus beaux témoignages de la richesse infinie de la Nature, et nous trouvons de tous côtés, dans les plus petits détails comme dans les grands ensembles, la répétition du processus évolutif.

Le renouvellement, à chaque période, des fonctions physiologiques précédemment décrites vient d'ordinaire compliquer les formations de caractères greffés sur les traits de constitution originelle.

Il y a toujours lieu de faire le départ entre les phénomènes qui ont laissé leurs traces dans une couche donnée, et ceux qui sont postérieurs à l'âge de cette couche.

Dans la première série, seront les accumulations de galets, les perforations par les lithophages, les *ripple marks*, les amoncellements de diatomées ou de foraminifères ; dans l'autre, les rognons de silex, les concentrations de sables résiduels de dénudation souterraine, les épigénies comme celles qui ont donné naissance soit aux grains phosphatés des craies sénonienne et danienne, soit aux pisolithes du minerai de fer toarcien de Lorraine.

Le recensement des faits de ce genre est la justification éclatante de la doctrine actualiste et sa conclusion est que chaque époque ressemble exactement à toutes les autres, sauf en ce qui concerne une sorte de coefficient qui lui convient exclusivement, qui dépend de son âge absolu et qui donne, à chacun des phénomènes la concernant, un degré d'intensité spécial.

Mais, ainsi que nous l'avons annoncé au début et ainsi qu'il convient maintenant de le prouver, cela ne

suffit pas, et la revue passée des périodes consécutives nous met devant les yeux un immense ensemble de faits dont l'interprétation conduit à reconnaître la modification continue, et non saccadée, des massifs constitués.

C'est, au propre, le point de vue *activiste*.

Tout d'abord nous devons arrêter notre attention sur des phénomènes qui montrent que des dépôts constitués à des âges quelconques, par des procédés analogues à ceux de la géologie contemporaine, ont été modifiés par des actions développées à un autre âge qui peut être déterminé.

Ainsi, nous avons cité plus haut les altérations métamorphiques que présente la craie d'Antrim au voisinage des éruptions basaltiques. Eh bien, il convient de remarquer que ces altérations se sont faites pendant les temps tertiaires : c'est alors que les basaltes ont fait éruption et l'on voit que les marbres qu'ils ont engendrés, quoique compris dans la couche de craie d'où ils dérivent, ne sont aucunement d'âge crétacé.

Il en est de même dans la plupart des cas où l'on constate les effets du métamorphisme de contact et qui consistent fréquemment dans les substitutions de roches complètement nouvelles aux roches initiales dont elles ont pris la place.

Des remarques identiques concernent les masses ayant subi le métamorphisme général. Il est bien évident que les ardoises d'Angers, en tant qu'ardoises, ne sont pas siluriennes. A l'époque silurienne il s'est déposé dans la mer une vase argileuse qui pouvait être fort ressemblante aux vases argileuses qui s'accumulent aujourd'hui dans nos océans. Il a sans doute fallu fort longtemps pour que l'action des agents souterrains ait transformé cette première matière en ardoise.

Quant à dire à quelle époque il faut rapporter la transformation, c'est ce qui ne semble pas possible, parce que dans ce cas elle n'est pas subite comme à la suite

d'une éruption rocheuse, et c'est justement pour cela que le métamorphisme général ne fait aucunement double emploi avec le métamorphisme de contact et va compléter les notions préliminaires que nous avons intérêt à recueillir.

Il est bien évident en effet, que les transformations qui nous occupent sont, comme nous l'avons d'ailleurs constaté, déterminées par la circulation souterraine d'eau convenablement échauffée et parfois chargée de principes dissous. La cause de l'échauffement est tout entière dans le recouvrement que le sédiment considéré subit au cours des âges de la part de sédiments plus jeunes que lui et qui viennent successivement le recouvrir en s'empilant les uns sur les autres. C'est très progressivement que la température de l'eau d'imprégnation, et par conséquent son énergie chimique, vont en augmentant au fur et à mesure de l'enfouissement et conformément à la loi de distribution de la chaleur souterraine. Donc, les réactions chimiques doivent se déclarer peu à peu et se poursuivre d'une façon continue et, on peut le dire, indéfiniment, mais avec des variations et des incidents divers qui dépendront de toutes les circonstances géologiques qui pourront survenir.

Le poids, toujours augmentant, des matériaux superposés exercera de son côté des réactions mécaniques auxquelles il est bien légitime de rattacher les changements de structure de la masse, et en particulier l'acquisition de son feuilleté, toutes les fois que la pression pourra déterminer un écoulement de la masse comprimée.

Rappelons-nous que les transformations ont le caractère continu et insistons sur l'appui que cette remarque procure au point de vue activiste.

L'actualiste disait tout à l'heure : le métamorphisme de la craie d'Antrim par le basalte qui l'a traversée est d'âge tertiaire ; mais l'activiste ajoute que ce métamorphisme comprend des caractères acquis à d'autres moments que

celui où l'éruption s'est déclarée. Auparavant la craie avait déjà cédé aux entreprises de l'eau et de la chaleur souterraines : son grain avait changé, ses éléments constituants s'étaient arrangés, les silex s'y étaient concrétionnés, certains d'entre eux avaient été dissous et, peut-être, des apports s'étaient-ils faits, en échange, au profit du sédiment secondaire. Mais il en a été de même après la sortie de la roche injectée et celle-ci a même pu donner aux agents souterrains une énergie nouvelle par la chaleur qu'elle a mise à leur proximité. De sorte que bien des caractères que présentent aujourd'hui les formations intéressées sont certainement postérieures, et très postérieures à l'époque tertiaire.

L'âge des éléments du sol diffère donc, en général, de celui des masses qu'ils constituent, et de plus, car c'est là le point de vue qu'il importe ici de bien mettre en valeur, il y a des âges très divers, depuis celui du dépôt jusqu'à l'époque actuelle pour les divers éléments associés.

Nous allons essayer, en passant en revue les grandes fonctions de la physiologie tellurique considérée dans le passé, de retrouver pour chacune d'elles non seulement ses manifestations à tel ou tel moment, mais les preuves de sa persistance continue.

I — LA FONCTION CORTICALE PENDANT LES TEMPS GÉOLOGIQUES

On a vu que par « fonction corticale » nous entendons l'ensemble des phénomènes qui prennent naissance dans l'écorce du globe en raison de sa situation instable sur un noyau qui se dérobe sans cesse sous elle, par suite de sa contraction continue ; et par suite aussi de sa flexibilité et de sa tendance à la fracture par torsion.

Il est indiqué de faire ici une allusion à la nature minéralogique des roches qui ont fait la substance de la croûte

initiale. De très longues recherches qu'il faut nous borner à mentionner m'ont appris que ces roches, de nature silicatée-magnésienne, se sont constituées non pas par fusion, mais par voie de réactions gazeuses et de concrétion brusque. La figure 11 représente des cristaux de pyroxène obtenus par ce procédé et où l'on peut constater une identité avec les éléments cristallins des roches magnésiennes profondes. On constate que ces cristaux, malgré

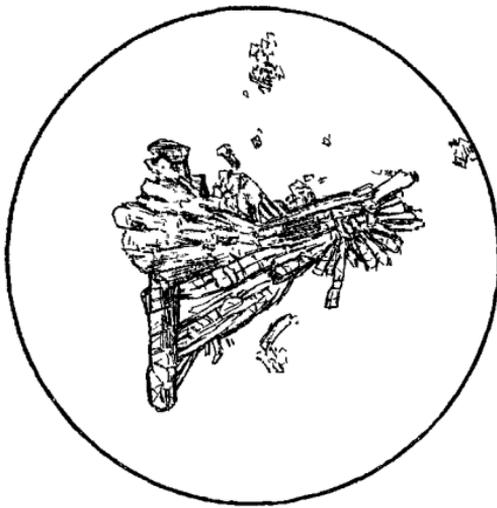


FIG 11 — Pyroxène de précipitation gazeuse, grossi 80 fois, pour montrer qu'il ne contient aucune inclusion gazeuse

leur origine, ne contiennent pas d'inclusions gazeuses comme on aurait pu le supposer *a priori*.

Quand on cherche à en retrouver les traces depuis les origines jusqu'à l'époque actuelle, on constate une ressemblance mutuelle des diverses époques qui est pleine d'enseignements. Les bossellements généraux se révèlent alors comme causes originelles du grand phénomène orogénique.

Les bossellements généraux sont des phénomènes à grande amplitude et dont le développement déborde de beaucoup la durée d'une période géologique. On le voit bien par exemple pour la Scandinavie, où le soulèvement

actuel du sol est la suite d'un mouvement dont les débuts remontent pour le moins à l'époque quaternaire la plus ancienne. On le voit bien pour l'Écosse, pour la Sicile, où les *parallel roads* et les plages soulevées sont aussi très loin d'être synchroniques.

Ce n'est pas tout de suite, d'ailleurs, qu'on a fait triompher l'opinion que des chaînes de montagnes peuvent résulter d'une succession d'efforts semblables à ceux que nous constatons dans les tremblements de terre. Cette idée admise maintenant est tout simplement traitée d'aberration par Ch. Sainte-Claire Deville à la page 571 de son cours de 1875 au Collège de France publié en 1878 sous le titre de *Coup d'œil sur l'Histoire de la Géologie*.

Le phénomène orogénique est un de ceux qui témoignent le plus de la persistance à travers le temps des actions physiologiques, et à cet égard l'histoire de l'Europe, considérée à part, est d'un enseignement spécialement éloquent. On y voit les preuves d'un effort toujours le même, continué depuis les temps archéens et donnant successivement naissance à toutes les chaînes, grossièrement parallèles, dirigées transversalement aux méridiens et qui sont d'autant moins anciennes qu'elles sont plus méridionales. Sans entrer dans le détail de cette constitution remarquable, rappelons seulement comment la méthode expérimentale a montré que malgré les intervalles de temps séparant les différents soulèvements, le phénomène qui les engendre est absolument continu. La force de compression semble s'emmagasiner dans le sol et à de certains moments elle se manifeste brusquement, pour redevenir occulte jusqu'à ce qu'un nouveau maximum se refasse. A ce point de vue, nous avons ici un exemple exceptionnellement fécond de la réalité de l'activisme, même dans les cas où *a priori* on serait le moins disposé à l'admettre.

Du reste, l'étude des grandes chaînes montagneuses montre d'habitude que les soulèvements dont elles sont le

produit se sont répétés pendant des périodes géologiques successives dans la même région et souvent dans des directions peu différentes. Les Pyrénées, les Alpes, le Caucase, l'Himalaya, ont fourni à cet égard des documents spécialement probants.

Pour l'ouverture des failles, il y a des quantités d'exemples que les localités d'élection sont restées favorables pendant fort longtemps. La presqu'île de Cornouailles est classique à cet égard, et l'on n'a pas assez remarqué les conséquences de la superposition qu'on y voit d'efforts ayant en définitive la même cause persistante.

Les schistes dévoniens (killas) qui font le sol du pays ont d'abord été recoupés de grandes géoclasses, par lesquelles se sont fait jour d'énormes éruptions granitiques. Il en est résulté des îlots granitiques qui donnent à la région un aspect si spécial. Et c'est plus tard, bien plus tard sans doute, que de nouvelles cassures dans les mêmes lieux ont ouvert le chemin à des éruptions métallifères de différentes natures.

Il y a bien longtemps qu'on a trouvé les moyens d'apprécier l'âge relatif de toutes ces manifestations des forces intérieures, et tout le monde a présente à l'esprit la tentative d'Elie de Beaumont, qui voulait subordonner toute la stratigraphie au soulèvement des chaînes montagneuses.

Le fait le plus considérable dans cette voie, c'est précisément la répétition dans un même massif d'efforts écartés plus ou moins les uns des autres et qui emploient à l'édification d'une même chaîne des périodes géologiques tout entières. L'histoire des Alpes et celle des régions analogues a contribué à nous faire admettre que, relativement à la physiologie tellurique, le soulèvement n'est pas du tout un accident brusque, mais un phénomène parfaitement continu, supposant dans les profondeurs le développement d'actions éminemment *activistes*.

2 — LA FONCTION VOLCANIQUE PENDANT LES PÉRIODES GÉOLOGIQUES

Parmi les aphorismes les plus célèbres d'Élie de Beaumont on remarque celui qui limite à la période actuelle l'existence des volcans à cratères. Aux anciennes époques se rapportent les roches « éruptives », mais le mécanisme de leur sortie est essentiellement différent de celui qui rejette les roches « volcaniques ».

Depuis la publication des *Leçons de géologie pratique*, le point de vue cataclysmien a dû abandonner ses positions et aujourd'hui on est forcé de reconnaître que le phénomène du volcan est aussi ancien que les premières formations sédimentaires.

Une dernière tentative de différenciation du présent avec le passé a consisté à supposer que la fonction volcanique aurait subi une atténuation considérable, comme une suppression pendant les temps compris entre l'ère triasique et l'éocène. Mais là encore, il a fallu se rendre à l'évidence des faits et on sait que le volcan ne s'est jamais arrêté depuis l'origine. On sait qu'il a toujours manifesté son activité de la même façon.

Ce qui avait causé l'illusion, d'ailleurs accueillie avec tant d'empressement, que nous venons de rappeler, c'est que les temps anciens ne nous ont conservé aucun cratère proprement dit. Mais il suffit d'un instant de réflexion pour reconnaître que le cratère est d'une fragilité si grande qu'il lui faut très peu de temps pour disparaître. Si notre Auvergne s'affaissait sous la mer, le premier effet des flots serait d'éparpiller les lapilli incohérents qui forment par leur accumulation le cône portant le cratère terminal. Déjà, les simples manifestations de l'intempérisme continental ont suffi pour rendre très indistincts les vestiges des plus vieux volcans des environs de Clermont ; par

exemple celui d'où est sortie la coulée de Gergovie et qu'on appelle le Puy de Berzé.

Combien à plus forte raison ont dû s'effacer les montagnes, jadis ignivomes, des temps carbonifère, dévonien et autres? Et cependant nous pouvons affirmer, à la suite de sir Archibald Geikie et de beaucoup d'autres géologues observant dans les pays les plus divers, que la sortie des roches éruptives, depuis les diabases jusqu'aux basaltes, s'est accompagnée partout et toujours de véritables manifestations volcaniques et que le moteur de l'ascension de ces laves antiques a été le même que le moteur des éruptions actuelles, c'est-à-dire la vapeur d'eau.

D'abord, on retrouve dans beaucoup de coulées de tous les âges les vacuoles caractéristiques des parties hautes des nappes d'Auvergne et des laves actuelles et qui sont vraiment le moulage des bulles de vapeur, — comme les vides de la mie du pain sont le moulage des corps aériformes engendrés dans la pâte pendant sa fermentation et pendant sa cuisson. Et l'on sait comment ces vacuoles, chez les spilites et les diabases, se sont constituées en petits laboratoires spécialement favorables à la production des noyaux d'agate et à la cristallisation des zéolithes et des minéraux connexes.

D'un autre côté, les nappes de roches anciennes sont associées dans leurs gisements de tous les âges avec des assises dont la signification n'a pas toujours été immédiatement comprise. Il s'agit de roches ayant la composition de silicates complexes où des protoxydes sont associés à de l'alumine, mais qui, parfaitement, stratifiées renferment souvent des fossiles. La contradiction apparente de ces deux ordres de caractères disparaît par la comparaison avec les cendres que les volcans actuels lancent parfois en si grande abondance sur le bord de la mer ou des lacs et qui vont se stratifier sous l'eau en se mélangeant avec toutes les productions aqueuses qu'elles peuvent rencontrer.

Ces matériaux meubles, identiques aux projections pul-

véruentes des volcans d'aujourd'hui, suffisent pour nous remettre véritablement devant les yeux de l'esprit des vieux cratères que ne peuvent plus voir les yeux du corps. J'écrivais déjà en 1879¹ : « Les roches plutoniques sont sorties des régions infragranitiques par un mécanisme du même genre que celui en vertu duquel les roches volcaniques viennent actuellement au jour. » Six années plus tard, en 1885, un traité classique de géologie² enseignait qu'il faut distinguer les éruptions de roches en deux séries, « l'une *ancienne*, dont les manifestations, fréquentes durant les temps primaires, ont généralement pris fin avec l'époque permienne, sauf dans certains districts, où elles ont continué jusqu'au déclin du trias ; l'autre *moderne*, dont les débuts paraissent dater de l'éocène et qui se poursuit encore de nos jours ».

« Il est visible, lit-on quelques lignes plus bas, que les éruptions de la première série ont dû s'accomplir en général sous une pression qui permettait l'existence de l'eau à l'état liquide et en présence de dissolvants de nature à favoriser la cristallisation³. *Au contraire*, dans la série moderne, la sortie des matières ayant eu lieu à l'air libre ou sous une faible pression, dans des conditions analogues à celles des volcans actuels, les gaz et la vapeur d'eau ont joué un rôle dans la constitution définitive des produits. »

Et enfin, toujours dans la même page et en manière de conclusion on ajoutait : « Sans nier que *les dernières éruptions* de la série ancienne aient pu *jusqu'à un certain point* revêtir le caractère *volcanique*, nous pensons que cette épithète, qui implique l'idée d'émissions subaériennes et de projections violentes, convient surtout à la série moderne. C'est sans aucun droit qu'on voudrait l'appliquer aux épanchements granitiques. etc.... »

1. *Les causes actuelles en géologie*, p 88

2 *Traité de géologie* par A. de Lapparent, 2^e édit, p 1292, 1885

3 Sénarmont a pourtant démontré les facultés cristallogéniques de l'eau surchauffée.

Je répète que cette citation n'a pas d'autre but ici que de bien constater l'état des esprits chez la majorité des géologues en 1885.

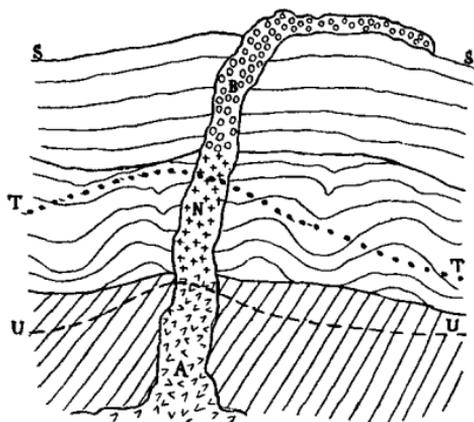


FIG. 12. — Schéma montrant comment la colonne éruptive normale se scinde en trois régions superposées, A acide, N neutre, B basique, qui se présentent au jour suivant les progrès de la dénudation qui donne les surfaces UU, TT, SS.

Aujourd'hui tout est bien changé et les traités les plus classiques ne font aucune difficulté d'admettre les volcans archéens, ordoviciens et autres ayant leurs laves (qui sont des granits et des porphyres) et leur tuf tout comme les volcans d'à présent. Et il semble que ce dont on a maintenant des exemples dans toutes les directions doit faire regarder pour une époque prochaine le triomphe définitif et complet de la doctrine actualiste, si dénigrée, avec ses conséquences les plus activistes.

On peut résumer dans le croquis de la fig. 12, qui est un simple schéma, les traits essentiels de la colonne éruptive qu'on peut appeler normale et dont la composition minéralogique comme la structure change du haut en bas avec les conditions mêmes de refroidissement et de la cristallisation du Magma infecté.

3. — LA FONCTION AQUEUSE PROFONDE, OU BATHYDRIQUE, PENDANT LES TEMPS GÉOLOGIQUES

Les preuves abondent qu'à toutes les époques géolo-

giques les eaux ont circulé dans les régions profondes de la croûte terrestre et déterminé des phénomènes dont l'explication complète est fournie par l'observation de localités actuelles.

Avant tout les eaux profondes se signalent comme les véhicules de la chaleur interne et, à ce titre, elles sont les agents les plus efficaces des métamorphismes. Qu'il s'agisse du métamorphisme général ou du métamorphisme de contact, ou encore du métamorphisme dynamique, dans tous les cas c'est l'eau chauffée par son contact avec les masses rocheuses profondes qui est l'agent actif des transformations. La fig. 13 est destinée à rappeler ce grand fait.

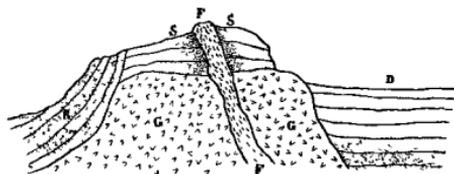


FIG 13 — Schéma destiné à rappeler les conditions les plus essentielles des trois formes principales du métamorphisme, toutes rattachables directement à l'intervention de la fonction bathydrigue. D, sédiment dont la partie inférieure a subi le métamorphisme général. S, sédiment métamorphisé par le contact du filon F R sédiment modifié par dynamo-métamorphisme

Parmi les phénomènes rattachables à la fonction bathydrigue, les plus simples consistent dans des poussées verticales de matériaux vers le jour par des eaux ascendantes.

Il faut, avant de décrire en quelques lignes les formations dont il s'agit, constater que les théoriciens ont souvent abusé de l'éruption aqueuse, au travers du sol, des substances dont l'origine les embarrassait. Il fut un temps où l'on faisait ainsi dériver l'argile plastique de phénomènes plus ou moins analogues à la sortie des boues dans les pélocones. C'est donc avec une grande prudence qu'on doit s'engager dans cette voie et même s'attendre à découvrir quelque jour que tel terme de la série n'a pas l'origine profonde qu'on lui avait attribuée.

Le premier exemple que j'ai rencontré de ces formations,

auxquelles j'ai donné le nom général d'alluvions verticales¹ m'a été procuré par l'étude des environs de Paris, et avant tout par la localité dite la Maladrerie de Montainville près de Beynes (Seine-et-Oise). Dans ce point une faille, affectant une direction sensiblement parallèle au cours moyen de la Seine et que l'on peut suivre depuis Vernon jusqu'au Plessis-Piquet, traverse la craie à *Micraster cor anguinum*, recouverte d'un lambeau peu épais d'argile plastique.

L'épaisseur de cette faille qui atteint plusieurs mètres est remplie d'un sable aussi remarquable par sa composition minéralogique que par son gisement si particulier. Soumis au lavage, il abandonne un limon très fin, micacé et de nature kaolinique, absolument infusible et restant blanc après sa cuisson. Le gravier extrait par la lévigation a donné au triage un grand nombre d'espèces de grains différents parmi lesquels les grains de quartz dominant de beaucoup.

Ce minéral se présente d'ailleurs à plusieurs états ; en cristaux souvent très nets à peine émoussés, mais plus ordinairement en grains hyalins dépourvus de forme, et contenant des inclusions gazeuses et liquides qui les font ressembler exactement au quartz du granit. D'autres fragments sont laiteux comme le quartz des filons, si fréquents au travers des roches cristallines. Çà et là se montrent des grains vivement colorés en jaunâtre, en rougeâtre ou en noirâtre. Parmi eux, il en est qui semblent consister en silex ; enfin il y a des fragments de quartzite et de meulières de structure et de nuances diverses.

Après le quartz, ce qui domine c'est le feldspath, rarement intact, reconnaissable à son clivage et à sa fusibilité, plus ordinairement devenu crayeux par un commencement d'altération. Il ressemble alors intimement à cer-

1. *Comptes-Rendus* du 11 septembre 1876.

taines variétés, fréquentes à Chanteloube (Haute-Vienne) par exemple, et qui forment un passage entre l'orthose intacte et le kaolin proprement dit.

Enfin, nous aurons énuméré les parties les plus facilement déterminables du sable en question quand nous aurons signalé des débris de corps organisés silicifiés. Ils sont extrêmement rares mais parfaitement caractérisés ; nous avons isolé spécialement des fragments de polypiers peut-être jurassiques.

On voit, par cette rapide description, combien le sable de Montainville est complexe : cela tient évidemment aux causes multiples qui ont présidé à sa formation.

En premier lieu, le granit constituant le soubassement de nos terrains stratifiés a été attaqué par des eaux sans doute chaudes et peut-être chargées de principes salins ou acides. La kaolinisation du feldspath opérée soit par les eaux souterraines soit par les agents externes postérieurement à l'ascension du sable n'a d'ailleurs pas été complète et c'est pour cela que le kaolin est accompagné comme on l'a vu, de feldspath, seulement crayeux ou même intact.

Dans la faille de la Maladrerie, l'eau jaillissante a entraîné les matériaux granitiques au travers d'une épaisse succession de terrains stratifiés, dont les éléments les plus résistants purent entrer en mélange avec les minéraux cristallins. Le silex surtout et les grès ont présenté les conditions favorables. Enfin on vient de dire que quelques fossiles silicifiés ont exceptionnellement échappé aux causes de démolition si nombreuses dans le courant sableux.

A côté de ce premier type d'alluvion verticale, dont l'interprétation n'a soulevé que des critiques non fondées par des auteurs partisans d'une arrivée des sables par la surface du sol après un charriage opéré du Plateau Central jusqu'à Paris, ce qui est insoutenable ; — à côté de ce type dont le sable de Montainville est le représentant, nous nous bornerons à citer ici les matériaux clastiques qui

servent de gangue au diamant dans les *pans* de l'Afrique australe.

Ici encore mes publications¹ ont été l'objet de critiques variées mais qui n'ont en rien modifié mon opinion primitive. Il faut dire d'ailleurs que j'ai étudié les sables diamantifères l'un des premiers en Europe et avec des matériaux beaucoup plus éloquents que ceux dont on a disposé depuis lors. C'étaient naturellement des prises prélevées sur les parties les plus supérieures des gîtes, sur les *chapeaux*, là où l'intempérisme avait fait disparaître certains éléments conjonctifs pour concentrer les matériaux résistants. L'analyse minéralogique m'a procuré toute une collection, conservée au Muséum, de spécimens très différents de ceux que l'on aperçoit dans les *blue ground* compacts et confus que l'on a surtout l'occasion de rencontrer maintenant.

Le résultat de l'examen que j'ai fait en 1877 des sables diamantifères de Dutoit's Pan, c'est qu'ils consistent en un mélange de grains ayant des compositions fort diverses, parmi lesquels dominant des serpentines et des roches analogues, n'ayant aucun rapport avec les masses encaissantes et provenant certainement d'une grande profondeur. L'examen des cheminées a montré, conformément à mes conclusions², que leur paroi a été énergiquement frictionnée par un courant ascensionnel de matériaux poussés des profondeurs. La qualification d'*alluvion verticale* leur convient mieux que celle « d'éjaculation boueuse » qui a été proposée et qui n'en est qu'une défiguration.

Mais le plus souvent les eaux circulant dans la profondeur ont réalisé des phénomènes chimiques.

L'une des formes les plus nettes résulte de l'obser-

1 *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, du 5 février 1877, t. XVIII, p. 380, t. CII, p. 637, *Bulletin de l'Académie royale de Bruxelles*, 3^e série, t. III, n^o 4, 1882; *Bulletin de la Société d'Histoire naturelle d'Autun*, t. VI, 1893 (avec 2 planches).

2. Mon travail a été l'objet d'un rapport favorable à l'Académie des sciences en mai 1877.

vation des gîtes métallifères et spécialement des filons concrétionnés. Il n'y a aucun doute que les failles n'aient servi, à toutes les époques, de canaux de circulation et de réceptacle de dépôts des eaux souterraines. Et l'on regarde comme des produits d'extravasement de ces mêmes dépôts les couches minéralisées ou silicifiées si fréquentes à tant de niveaux. Par exemple, celles de de la Voulte (Ardèche), celles du silurien de Saint-Rémy (Calvados) et des infinités d'autres.

Les poches métallifères auxquelles se rattachent, par exemple, les gisements de zinc de la Vieille-Montagne et du Laurium, les gîtes de phosphates du Quercy, de bauxite de Provence, tiennent à la même circulation profonde, et témoignent, en même temps, des propriétés précipitantes du calcaire dont les effets sont de tous les lieux et de tous les temps.

Et c'est par transition insensible qu'on passe de ces considérations à celles qui concernent la fossilisation des corps organisés et la concrétion lente des rognons de tous genres, et spécialement de ceux dont la composition est calcaire ou siliceuse.

La silice mérite de figurer au premier rang de la catégorie des substances qui jouissent d'une solubilité faible dans les eaux d'imprégnation des roches et obéissent à l'attraction moléculaire sans manifester des propriétés cristallines. A ce titre, elle se rapproche de la limonite, mais son histoire, bien plus compliquée, bien plus riche en conséquences de tous genres, a été encore plus incomprise que celle de l'hydrate de fer. Il y a lieu d'y insister d'autant plus qu'il ne sera pas difficile de montrer, chez la silice, une incontestable ressemblance d'allure avec le phosphate de chaux ; si bien que l'étude des dépôts siliceux va nous préparer à comprendre, jusque dans les détails, la manière d'être de plusieurs types de gisements phosphatés.

Une des formes les plus simples et les plus analogues

en même temps, à des types déjà mentionnés, c'est celle de rognons siliceux comme on en voit dans l'épaisseur de la craie blanche et d'une façon spécialement nette sur le front d'attaque des falaises de la Haute-Normandie. Ces rognons, par les fossiles qu'ils empâtent souvent, comme par leur liaison avec des plaques siliceuses concrétées dans les fissures du terrain, se montrent bien comme d'âge postérieur à celui de la craie qui les renferme. Leur situation ordinaire en nappes horizontales à peu près équidistantes témoigne aussi de leur origine concrétionnée et il en est de même de leur équidistance réciproque. La silice circule évidemment à l'état de solution d'hydrate et elle est arrêtée au passage par certains centres d'attraction, autour desquels elle se constitue en nodules progressivement plus gros et dont les stases d'accroissement se traduisent souvent par la constitution de couches concentriques.

Il y a d'autant plus d'intérêt à se demander d'où vient cette silice dissoute que la réponse sera d'application directe à d'autres problèmes et par exemple à celui du phosphate de chaux. Or ce qui paraît de beaucoup le plus probable, c'est qu'il s'agit avant tout de silice organique; c'est-à-dire de silice ayant fait partie de la substance d'êtres vivants, soit de végétaux comme sont nos diatomées, soit de radiolaires parmi les animaux, ou de spongiaires, ou encore d'échinodermes à spicules siliceux comme sont tant d'holoturidées. Dans les organismes, la silice n'est sans doute pas libre et il ne suffit pas que l'analyse chimique l'en isole pour qu'on soit assuré qu'elle n'entrait pas dans la constitution de composés beaucoup plus complexes; comme le carbonate et le phosphate de chaux qui n'existent pas véritablement dans les os, où l'observation microscopique saurait bien les déceler, et qui s'y constituent de toutes pièces sous l'influence des réactifs, au cours même des analyses. En tous cas, par la décomposition des organismes mentionnés tout

à l'heure, de l'hydrate de silice est abandonné aux eaux d'infiltration et il va se concentrer dans les lieux de la précipitation.

La cause de cette dernière n'est pas toujours facile à voir, au moins quant à son début ; mais une fois commencée, elle trouve en elle-même une raison suffisante de sa continuation. En outre, on constate qu'en conséquence de la mobilité même des molécules minérales, l'état de la substance concrétionnée va en se modifiant progressivement. La perte de l'eau de combinaison, analogue à celle à laquelle on assiste pour les geysérites, fait passer le nodule de l'état d'opale à celui de silex, puis à celui de calcédoine, et enfin à celui de quartz hyalin, qui peut se constituer en géodes parfois très largement cristallisées.

Tandis que, dans la craie et dans le calcaire grossier, ces étapes sont rapidement franchies, l'état hydraté persiste dans les masses du gypse et dans le travertin de Saint-Ouen, où des nodules d'opales (ménilites) sont à certains niveaux extrêmement abondants.

La croissance des nodules siliceux se continue plus ou moins longtemps, et sa durée dépend à la fois de la richesse des sources d'alimentation et de l'activité de la précipitation. Au premier point de vue il y a d'extrêmes différences d'une couche à l'autre : certains niveaux de craie sont très siliceux pendant que d'autres ne le sont pas du tout. Pour ce qui est de l'activité de précipitation, une idée qui paraît légitimée par la structure de beaucoup de silex, c'est qu'il ne s'agit pas d'un phénomène exclusivement minéral et que des éléments organiques, peut-être même des cellules vivantes, peuvent intervenir au moins dans certains cas. On sait, en effet, que sous l'influence de la chaleur, les silex de la craie dégagent une substance qui n'est pas sans analogie avec les produits de distillation des tissus végétaux¹.

1. Voyez *Excursion géologique à travers la France* (1882), p. 21.

Quand l'alimentation est indéfinie et la durée du phénomène suffisante, les rognons lentement grossis peuvent se souder les uns avec les autres et constituer peu à peu des couches entières, dont l'origine a été habituellement mal comprise et relativement auxquelles on a édifié souvent des théories compliquées et inacceptables.

Suivant moi, en effet, le mécanisme de la silicification lente explique, sans chercher plus loin, le mode de formation des meulière. Il faut voir dans ces matériaux siliceux une simple exagération de l'épigénie qui donne naissance si souvent à la production des troncs d'arbres silicifiés. De même que dans le cas des troncs d'arbres, on trouve que la silice s'est substituée aux molécules des tissus organiques, ou du moins les a moulées très exactement; de même dans le cas des meulière on trouve que cette même matière siliceuse s'est substituée à toutes les particules constituant primitivement les couches. L'histologie de ces couches (pour ainsi parler) s'est conservée et les fossiles qu'elles renfermaient se sont silicifiés sans modification de forme. Comprise ainsi, la théorie des meulière n'offre aucune de ces difficultés qui, autrement, la rendraient inextricable: plus de sources geysériennes, plus de manifestations exceptionnelles d'une activité spéciale: au contraire, simple silicification de matière calcaire ou autre. Si la place le permettait, je résumerais ici les observations que j'ai accumulées dans des séries de régions et qui toutes me paraissent justifier pleinement l'hypothèse que je viens de formuler.

Normalement, la meulière (fig. 14) a débuté dans une couche calcaire et elle a pu subsister dans le calcaire; quand elle est noyée, comme c'est le cas très fréquent, pour les meulière superficielles, dans une argile, c'est que le terrain dont elle fait partie a subi la dénudation souterraine. Les meulière des terrains houillers si riches en végétaux silicifiés à Autun et à Saint-Etienne (Saint-Priest), s'expliquent de la même manière, sans sources siliceuses spéciales.

Le calcaire mérite à cet égard d'être cité à la suite de la silice et l'on peut suivre dans certains cas les étapes de production de vrais nodules de cette substance.

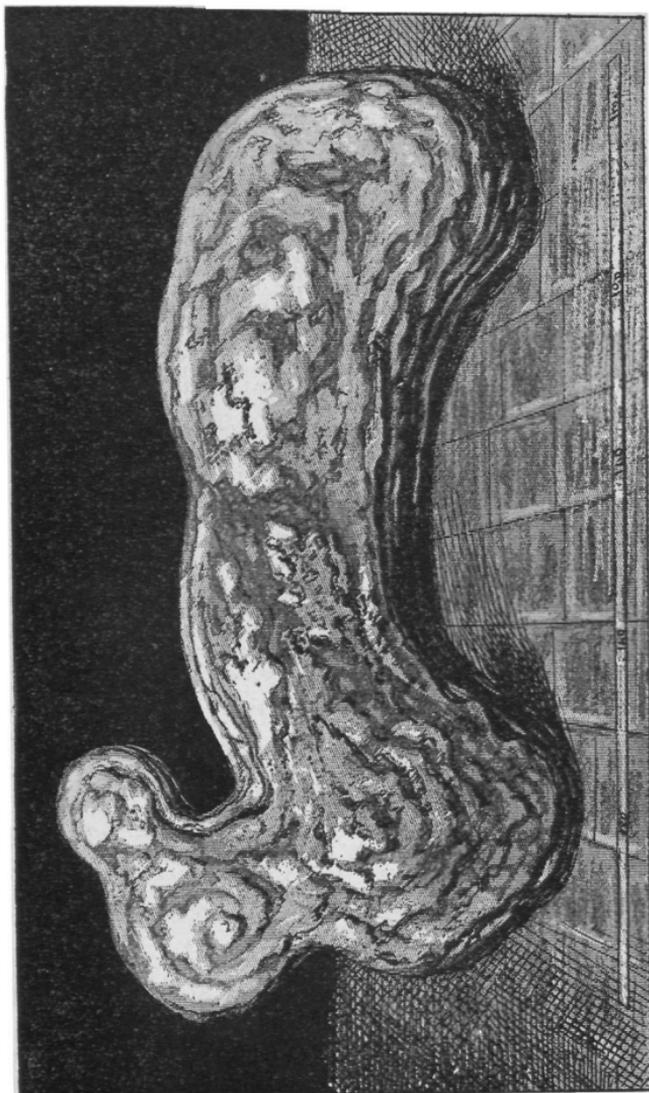


FIG 14 — Regnon de meulière de Beauce, provenant de Montmorency et exposé au Muséum.

Par exemple, dans le département de l'Oise, on voit en beaucoup de localités les sables de la glauconie moyenne et de la glauconie supérieure s'indurer par un apport progressif d'un ciment calcaire et souvent dolomitique. C'est

ainsi que se constituent les « têtes-de-chat » de Verneuil, de Pont-Sainte-Maxence, etc., dont la matière incrustante dérive sans doute du calcaire grossier superposé où la dé-

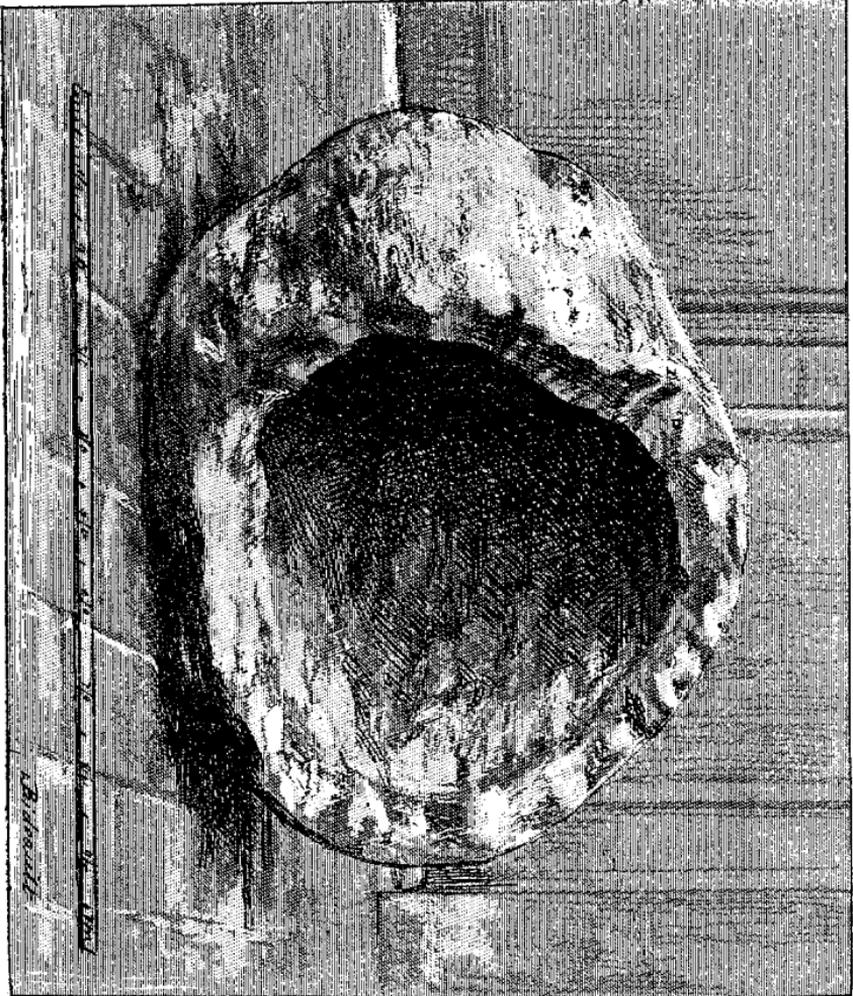


FIG 15. — Nodule creux de grès subordonné au sable moyen de Puteaux (Seine) pour montrer les variations successives d'une concrétion réalisée autour d'un même centre

nudation souterraine s'est exercée très activement. Tantôt les nodules sont parfaitement séparés les uns des autres, tantôt ils sont soudés ensemble et constituent comme des couches extrêmement tuberculeuses.

Pour les concrétions calcaires il y aurait à mentionner spécialement les nodules marnolithiques si fréquents à beaucoup de niveaux et aussi les masses de grès dont les formes sont si variées et parmi lesquelles se signalent des boules *creuses* du genre de celle que représente la figure 11 et dont les couches ont été étudiées avec détail.

Dans la masse même de la craie il se fait, quand les conditions sont favorables, un remaniement de la matière calcaire, et c'est ainsi qu'à Margny, près de Compiègne, et bien ailleurs, on rencontre la craie qualifiée de noduleuse par Graves, dont la structure est si particulière et que je cite d'autant plus volontiers qu'elle paraît offrir un terme transitoire vers un état fréquent de beaucoup de calcaires qui a été d'ordinaire interprété d'une manière tout à fait fantaisiste. Je veux parler de la structure pisolithique et de la structure oolithique.

On sait en quoi cette structure consiste : la roche qui la présente est plus ou moins complètement constituée par de petites sphérules appelées, suivant leur grosseur, pisolithes ou oolithes, le terme de comparaison étant, suivant les cas, un pois ou un œuf de poisson.

Pour le calcaire, les oolithes et les pisolithes sont avant tout formées de couches concentriques, et le centre en est généralement occupé par un petit corps organique (débris de coquille, etc.) ou non organique (grain de sable, fragment de calcaire amorphe, etc.), qui semble ainsi jouer un rôle attractif sur le carbonate de chaux, etc.

Les couches concentriques sont d'ailleurs éminemment cristallisées et formées d'individus plus ou moins aciculaires orientés vers le centre.

Il se fait à l'époque actuelle des oolithes et des pisolithes calcaires tout à fait semblables pour la structure à celles des formations géologiques, et on en a conclu que le même mécanisme s'appliquerait aux uns comme aux autres. Nos oolithes modernes se recueillent dans le bassin de sources carboniquées comme celles de Karlsbad, de

Tivoli, de Vichy, et il faudrait en conclure que la suspension, dans un bouillon analogue à ceux de ces localités, a déterminé la production des oolithes secondaires.

Cette opinion est insoutenable et il suffit d'un coup d'œil sur la première venue des carrières où les calcaires oolithiques jurassiques sont exploités, pour s'étonner qu'on ait pu avoir un seul instant une idée aussi étrange. Il s'agit, en effet, de dizaines de mètres d'épaisseur sur des kilomètres et des kilomètres de superficie, et en outre les couches les plus oolithiques sont souvent en même temps fossilifères, et ne ressemblent en rien au dépôt d'une eau inhabitable aux animaux comme celles qui viennent d'être citées.

On a parfois fait une autre hypothèse plus admissible à première vue et qui est fondée aussi sur des observations actuelles : elle consiste à croire que les globules des anciens sédiments ont la même origine que certaines oolithes qui, de nos jours, se produisent au voisinage des récifs madréporiques dans les eaux marines très chaudes. Certes, on ne saurait contester que le processus actuel n'ait pu s'appliquer dans les anciens temps et il doit y avoir, surtout dans les terrains riches en polypiers, des globules calcaires ainsi formés ; mais ils ne doivent constituer qu'une faible minorité et la grande masse de l'épaisseur des calcaires n'a rien de coralligène dans sa structure. On peut même citer des calcaires oolithiques ou des niveaux évidemment saumâtres ou correspondant à des mers extrêmement peu profondes. L'un des plus nets, sans doute, concerne un petit lit de calcaire franchement oolithique subordonné aux marnes supragypseuses des environs de Villejuif, à la porte même de Paris.

La première fois que j'ai étudié cette roche intéressante, et imbu que j'étais alors des idées courantes, j'ai pensé y voir un produit de source ; mais en l'examinant de plus près au point de vue nouveau où je suis placé, j'y ai reconnu un résultat de modification moléculaire éprouvé

très lentement par une masse marneuse. La calcite, obéissant aux forces cristallogéniques, s'est concentrée autour de certains points et l'argile a été éliminée dans les intervalles. L'homogénéité de la substance première est cause que les centres d'attraction se sont constitués à des distances mutuelles sensiblement égales et, dès lors, tous les globules résultant ont dû mesurer sensiblement le même diamètre.

Par comparaison, on arrive à reconnaître que toutes les couches calcaires oolithiques, celles avant tout du terrain jurassique, résultent de ce même phénomène, dont l'importance complètement méconnue ne saurait être contestée et qui va se représenter à nous sous toutes sortes de formes.

Nous pourrions développer, avec les dimensions d'un gros volume, la démonstration de ce fait qu'à toutes les époques la nappe d'eau profonde a réalisé des effets comparables à ceux qu'elle détermine sous nos yeux, et c'est une des preuves les plus complètes que l'on puisse donner de la légitimité du point de vue actualiste.

Mais nous avons ici à aller beaucoup plus loin et à constater que la circulation bathydrique est continue, et que par conséquent les roches de tous les âges sont, au même moment, soumises à son action. De façon que les résultats qu'elle doit produire, et qui doivent varier avec sa composition comme avec sa température se superposeront et se modifieront, dans un sédiment donné, au fur et à mesure des progrès de son âge. Quand nous examinons maintenant un sédiment ancien, nous sommes d'abord tentés de rattacher à l'époque même de son dépôt toutes les particularités qu'il présente. Plus tard, renseignés par les découvertes des actualistes, nous reconnaissons que certains traits de sa constitution sont postérieurs à son dépôt et à l'intervention de causes postérieures. Enfin, pénétrés du point de vue activiste, nous constatons que tout change constamment dans sa masse et nous re-

connaissions des accidents de structure et de composition qui peuvent se répartir dans une durée extrêmement longue.

Il paraît utile ici, au lieu de rester dans les généralités, d'esquisser comme exemples l'histoire d'une ou deux formations remarquables. Nous choisirons, d'une part, la phosphorite des terrains sédimentaires ; de l'autre, le minerai de fer oolithique du lias supérieur.

Pour fixer les idées, et afin d'avoir un terme de comparaison très complet, nous commencerons par rappeler la structure des gisements de sable phosphaté qu'on exploite autour de Doullens (Somme) ou d'Hardivillers (Oise), et qu'on retrouve avec des caractères tout à fait analogues soit autour de Mons (Belgique), soit dans diverses localités du Sud de l'Angleterre.

A Beauval, par exemple, voici ce que montrent les exploitations¹ :

Sous la terre végétale peu épaisse et assez argileuse, se rencontre d'abord un *bief* sableux, plus ou moins voisin de la terre à brique de la Flandre, puis un autre bief beaucoup plus gras, renfermant des silex, et fort analogue au terrain superficiel de la craie du Perche, du Beauvoisis, de la Champagne et de bien d'autres régions. C'est au-dessous de cette vraie *argile à silex* que se présente le sable phosphaté qui repose sur de la *craie brune*, c'est-à-dire sur de la craie piquée d'innombrables petites sphérules de phosphate de chaux plus ou moins rapprochées les unes des autres, suivant les points.

La surface de la craie est remarquablement irrégulière, creusée profondément de dépressions en entonnoir, que séparent des reliefs adoucis. Dans les parties constituées par les dépressions, les différents dépôts mentionnés plus haut se superposent dans l'ordre indiqué et forment

1. Stanislas Meunier, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CIII, séance du 11 octobre 1886, et t. CVI, séance du 16 janvier 1888.

comme des cornets emboîtés les uns dans les autres, et de moins en moins accusés, à mesure qu'ils occupent un niveau plus élevé.

Cette description du gîte de Beauval étant bien présente à l'esprit, nous allons voir que les particularités constatées résultent avant tout de l'activité incessante du milieu géologique, et on n'aura pas de peine à apprécier les conséquences pratiques de cette constatation.

Tout d'abord, il est manifeste que le sable phosphaté ne s'est pas déposé à l'état de sable, mais qu'il résulte d'une dénudation subie souterrainement par la craie brune ; cette roche a été dépouillée de toute sa partie calcaire, et réduite à l'amoncellement de ses éléments phosphatés.

Ceci mérite de nous arrêter un moment et représente, sous une forme spécialement sensible, un phénomène normal, répété de toutes parts.

Dans la plupart des cas, les eaux d'infiltration sont plus ou moins chargées d'acide carbonique et douées, en conséquence, de propriétés dissolvantes vis-à-vis du carbonate de chaux. Il en résulte que leur renouvellement sur un banc de craie se traduit par l'ablation superficielle de cette roche qui, peu à peu, s'amincit et disparaît. Si elle n'est pas pure et contient des particules insolubles ou peu solubles, celles-ci resteront comme résidu.

Si l'on suppose, comme disposition la plus simple, qu'un calcaire soit recouvert d'une couche sableuse parfaitement poreuse, il est clair que les eaux météoriques filtrées par le sable pourront agir sur le carbonate de chaux comme elles le faisaient précédemment sur la craie superficielle. Un cas voisin de celui que nous supposons est réalisé aux environs mêmes de Paris, dans les nombreuses localités où, comme à Ivry, le calcaire grossier est surmonté de graviers diluviens. On constate alors la dénudation de la pierre à bâtir qui se ravine, se perfore de « puits naturels » et se recouvre du revêtement argileux représentant le résidu de sa dissolution. Souvent l'argile

ainsi produite est remarquable par sa finesse et sa pureté ; quand elle échappe au mélange des particules étrangères, par exemple dans les perforations étroites, elle ressemble à la lithomarge et a été, en effet, considérée à tort par beaucoup d'auteurs comme devant avoir une origine hydrothermale.

Dans le Nord de la France, où la craie ravinée est souvent surmontée d'une assise de sables tertiaires, on a souvent pensé que les irrégularités de la surface supérieure témoignaient de l'action qu'elle avait éprouvée, dans une région littorale, de la part des vagues de la mer où ces sables se seraient déposés. Plus d'une fois, il n'y a là qu'une simple illusion ; le sable (ou, suivant les cas, la roche dont il provient) était superposé à la craie normalement terminée et c'est la dénudation souterraine qui a imprimé à la zone de contact le caractère actuellement constaté.

On conçoit tout de suite comment, par la continuation de ce mécanisme, une couche donnée, après avoir pris une allure de formation ravinée, peut reconquérir un état comparable à celui d'une formation normale par la soustraction, à la fin réalisée, de tout ce qui était soluble dans la masse primitive.

Cette remarque s'applique directement à l'histoire du gisement phosphaté de Beauval. En effet, nous pourrions trouver des étapes successives dans l'état de dénudation qu'il présente et d'autres qui pourraient faire deviner son avenir si l'exploitation n'y avait mis nécessairement fin.

Ainsi, M. Strahan¹ a décrit à Lodge-Pit, Taplow County, une coupe où nous retrouvons la craie de Beauval identique au type, mais recouverte de sédiments normaux et n'offrant aucune trace de dénudation superficielle. Il est important d'en retenir ce fait qu'au-dessous de la terre

¹ Phosphatic chalk with belemnitella quadrata at Taplow. *Quarterly Journal of the geological Society of London*. August 1891.

végétale et du sous-sol limoneux, se développent douze pieds de craie blanche douce, c'est-à-dire argileuse, et que c'est plus bas que, sur huit pieds d'épaisseur, se montre la craie phosphatée avec des fossiles identiques à ceux des environs de Doullens (*Belemnitella quadrata*, etc.).

Si l'on compare cette coupe à celle donnée plus haut pour Beauval, on arrive très aisément à comprendre comment elle pourra en prendre tous les caractères : la dénudation subaérienne augmentera chaque jour l'épaisseur du revêtement limoneux, puis la craie blanche à silex étant attaquée à son tour, elle se réduira progressivement en un manteau argileux plein de pierrailles ; après son décapement, la craie brune sera mordue à son tour et elle offrira alors des dépressions, ou poches, doublées de sables phosphatés et renfermant, par affaissement progressif, les matières superposées descendues en cônes.

Dans cette coupe de Beauval, le sable phosphaté contenu dans les poches représente donc une certaine épaisseur de craie brune déjà dénudée ; l'argile à silex que nous avons notée sur ce sable représente, sans aucun doute possible, une couche maintenant tout à fait décalcifiée de craie argileuse renfermant des rognons de pierre à fusil ; le bief sableux du haut est le résidu d'une formation plus récente, peut-être d'un calcaire tertiaire, et chaque niveau se montre, en résumé, comme un *extrait* maintenant descendu d'une assise primitivement réglée qui existait dans la verticale du lieu au-dessus de la surface actuelle du sol.

On pourrait répéter tout ceci mot à mot, à l'égard du célèbre gisement du Mesvins, près de Mons, que j'ai eu la bonne fortune de visiter avec M. Cornet, qui en avait fait une étude très détaillée¹. Sur la craie ravinée à *Belemnitella mucronata*, se montre le sable phosphaté doublant les poches et mélangé à des silex dans les points

1. Cornet, *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, August 1886.

où les poches sont assez profondes pour intéresser la craie silicifère. Plus haut se présente un sable glauconifère qui contient à sa base des silex de la craie et qui est, sans doute, le produit de lessivage d'un calcaire tertiaire maintenant disparu; plus haut, viennent des « loess » variés qui s'interpréteraient comme ceux de Beauval.

De tous les côtés, nous retrouverons ainsi des séries de dépôts qui sont des résidus de couches distinctes ayant conservé à peu près leurs situations relatives et représentant un remaniement vertical, sans déplacement horizontal sensible. Auprès de Dreux, les coupes classiques de la plaine d'Abondant montrent, sur la craie ravinée, l'argile à silex recouverte de sables qui sont vraisemblablement des restes de lessivage de formations tertiaires.

Dans les Ardennes, nous trouvons à faire application de ces faits à des terrains phosphatés. Auprès de Grand-Pré les minières d'où l'on extrait les « coquins », montrent sur les couches kimmeridgiennes une assise de un à deux mètres d'un sable d'un vert sale renfermant des grains de minerai de fer et de quartz jaune et translucide, ayant rigoureusement le faciès d'un produit de lessivage. Plus haut, se présentent, sur deux mètres environ, des sables argileux comprenant une couche de nodules phosphatés, et, ici encore, l'intervention de la dénudation souterraine est absolument manifeste.

Dans d'autres cas, cette même dénudation s'exerce, non plus sur une roche à la fois quartzifère et phosphatée, mais sur une roche seulement phosphatée, il en résulte une couche exclusivement formée de débris fossiles : les *bone-beds* du lias et d'autres niveaux n'ont pas d'autre origine, et leur mention suffit pour montrer toute l'importance pratique que peut présenter l'ensemble des phénomènes qui nous occupent.

Il est intéressant de rappeler que le phénomène dont résultent les *bone-beds* s'est reproduit à des époques très diverses et aux dépens des terrains les plus variés, mais

toujours dans les mêmes conditions. Tout le monde connaît les exemples fournis par le *tilestone* (silurien) de l'Angleterre: par les grès marneux carbonifères du Yorkshire et des environs de Bristol; par les *lettenkohlsandstein* triasiques des environs de Tubingue; par le grès infraliasique (*bone-bed* par excellence), remarquable par sa présence, en Bourgogne, dans le bassin du Rhône, en Angleterre, en Italie et dans une foule de points de l'Europe.

On n'a pas assez insisté sur ce fait que, dans l'immense majorité des cas, ces débris phosphatés sont accumulés dans des couches sableuses, pierreuses ou argileuses, c'est-à-dire insolubles, comparables à celles qui composent le résidu de dénudation souterraine.

La constitution de bien des gîtes exploitables et spécialement de gîtes riches de phosphate de chaux, se présente comme un cas de triage opéré dans les profondeurs du sol par la circulation d'eaux jouissant d'un pouvoir de dissolution inégal sur les différentes substances préalablement mélangées.

Ce premier fait une fois acquis, il reste à en démontrer un second, peut-être moins conforme aux idées les plus généralement reçues et qui va compléter la théorie des gîtes phosphatés.

Le phénomène sur lequel il nous faut maintenant appeler l'attention pour rendre entièrement compréhensible l'origine et le mode de formation des gîtes phosphatés, se rattache comme le précédent à l'incessante activité qui règne dans les profondeurs du milieu géologique et qui vient contredire la première impression qu'on se fait, au début des études de géologie, à la vue du front de taille d'une carrière, à savoir que toutes les particules entrant dans la constitution des couches du sol y sont accumulées depuis tout le temps que ces couches existent.

La décalcification dont on a parlé précédemment, et qui a sa cause dans la circulation incessante des eaux au travers des roches, a sa contre-partie très exacte dans la ge-

nèse d'une foule de corps minéraux résultant de ce même mécanisme de déplacement aqueux. Les diverses substances mélangées ou combinées dans les roches acquièrent une mobilité plus ou moins grande par leur solution les unes dans les autres, et elles peuvent souvent alors obéir à une attraction qui les concentre autour de certains centres et les sépare en conséquence des éléments différents. Nous sommes donc encore ici en présence de phénomènes de triage, mais cette fois, l'analyse immédiate, dont l'épaisseur des roches est le théâtre, se fait sans soustraction de matière et simplement par déplacement relatif.

Il résulte d'une foule d'observations que le phosphate dérive avant tout de débris organiques et habituellement de cadavres ou de déjections d'animaux.

Ces substances abandonnées dans des vases marines et par exemple dans la vase calcaire de la mer crétacée, ont développé des réactions chimiques avec le carbonate de chaux ; il s'est fait d'ordinaire des phosphates doubles de chaux et d'ammoniaque dont la solution a imprégné le sédiment et s'est mise à s'y écouler comme tout à l'heure les eaux siliceuses. Autour de certains centres (fig. 16), la concrétion s'est produite et comme l'imprégnation était uniforme les nodules se sont faits à distances relativement égales ; la matière étant bien moins abondante que la silice de tout à l'heure les nodules sont restés plus petits et ils ont cessé de croître quand la craie empâtante a été privée de toute sa matière phosphatée. Dans la lumière polarisée, on reconnaît (fig. 17) que les granules de phosphate sont formés d'aiguilles rayonnant autour d'un centre et souvent que plusieurs globules élémentaires ont été réunis par une enveloppe phosphatée commune.

Pour qui a donné au phénomène de la silicification une attention suffisante, celui de la phosphatisation semble tout à fait simple et ne nécessite aucune de ces suppositions bizarres dont on l'a encombré. Par exemple, et dans ces derniers temps, on a voulu faire des granules (fig. 18)

du genre de ceux de la craie de Beauval, des objets qui ont été enfouis *tout formés* dans le dépôt crayeux. C'est

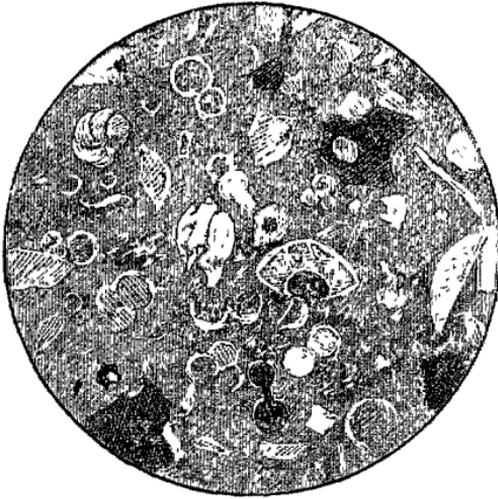


FIG 16. — Coupe mince de la craie phosphatée de Beauval vue au microscope, au grossissement de 60 diamètres On y voit des tests foraminifères phosphatisés et des nodules constitués également par du phosphate concrétionné

méconnaître ces phénomènes si incontestables dont la description vient de nous occuper et qui témoignent de l'incessante activité des phénomènes de la dénudation

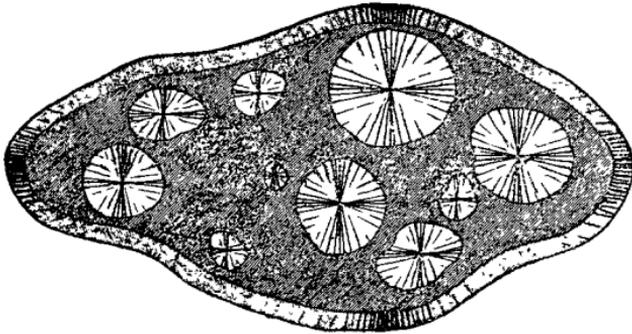


FIG 17 — Un granule phosphaté de la craie de Beauval grossi 300 fois On y voit des globules élémentaires donnant dans la lumière polarisée la croix noire tournante et la réunion de plusieurs de ces globules dans un nodule commun ayant une enveloppe phosphatée.

souterraine. Un auteur que l'étude des phosphates occupe depuis longtemps, M. Lasne, y persiste cependant.

« La structure de la craie phosphatée, dit-il, est des plus intéressantes à examiner au microscope ¹. Les grains de phosphate sont isolés au sein d'un calcaire non phosphaté et identique à la craie blanche normale. Il n'est pas douteux que leur origine ne soit *antérieure* ² à la formation

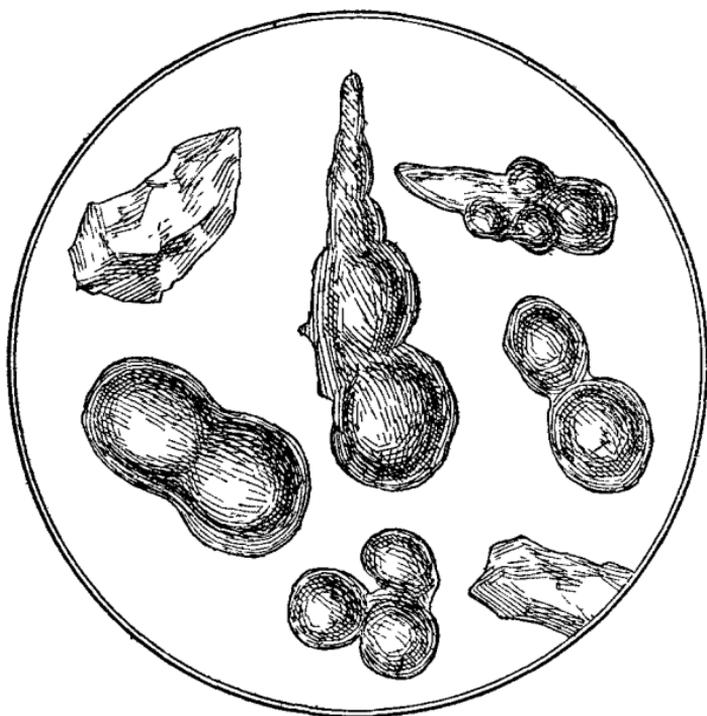


FIG 18 — Nodules de la craie phosphatée déposés par lavage et grossis 200 fois. On voit leur forme tuberculeuse et fréquemment gémmee conforme à celle de beaucoup de produits concrétionnés.

de la roche, autrement dit que cette roche ne soit déposée telle que nous la retrouvons.

« Or, parmi ces grains de fluophosphate, il en est qui sont de petits rognons amorphes de dimensions microscopiques ; mais d'autres révèlent des formes organisées,

1. Rapport présenté en 1896, au Congrès international de Chimie appliquée, p. 29.

2. C'est l'auteur lui-même qui souligne ce mot qui, pour nous, constitue une erreur manifeste.

parmi lesquelles les foraminifères sont les plus fréquents.

« On reconnaît le test de ces foraminifères, l'intérieur des loges est rempli de cristaux rares de fluophosphate et l'extérieur est revêtu d'une auréole de phosphate concrétionné. Cette auréole entoure également la plupart des autres débris, notamment, des cristaux de calcite et de petites esquilles d'os de poissons. Il résulte de cet examen que ces corps, tests de foraminifères, cristaux de spath, etc., ont été maintenus en suspension au sein du courant phosphaté assez longtemps pour que ces concrétions se produisissent. Le temps de leur chute libre dans une mer qui n'était pas d'ailleurs d'une grande profondeur ne fournirait certainement pas une explication suffisante; mais il semble qu'on arrive à une conception satisfaisante si on admet que ces grains phosphatés se soient produits à la surface des végétaux que la mer nourrissait (sortes de sargasses) qui contribuaient précisément à dépouiller l'eau d'une partie de l'acide carbonique qu'elle contenait et provoquait par suite la séparation de fluophosphate. »

Cette laborieuse explication est manifestement en opposition avec les faits d'observation. Seule la concrétion intramoléculaire dans les pores de la craie, aux dépens de liquide phosphaté circulant, reste compréhensible. Jamais, du reste, on n'a vu sur des sargasses de test de foraminifères se phosphatiser; encore moins des « esquilles d'os de poisson » ne se rencontrent-elles pas sur les fucus nageant. Et que dire des pommes de pins phosphatées et des ammonites du gault dont la fossilisation, malgré la taille, doit être identique à celle des débris contenus dans la craie brune? Parmi ces derniers, il faut signaler, comme très nombreux, des baguettes de carbonate de chaux qui ne sont que les fibres des énormes coquilles d'inocérames: les voit-on déposées sur les sargasses?

Quant à la réaction chimique qui a donné lieu à la con-

création, elle est maintenant bien connue. M. A. Gautier a montré comment, dans la grotte de Minerve, les guanos donnent lieu par leur contact avec le calcaire et par l'intermédiaire de phosphates ammoniacaux à la production du phosphate de chaux ; l'étude des phosphates du Grand-Connétable (Guyane) fait voir¹ que les roches alumineuses peuvent intervenir pour déterminer la production du phosphate d'alumine. Les gîtes de phosphorite du Quercy dérivent des mêmes actions plus longtemps continuées et cette fois aux dépens de calcaires stratifiés que les caux phosphatées sont concavés et creusés de poches semblables à celles qui renferment la bauxite et le fer en grains.

A Beauval et dans les localités analogues, ces réactions se sont passées dans la masse même de la craie et il s'est fait des rognons phosphatés comme il s'était fait des rognons siliceux. Que si l'on demande comment il se fait que la craie ambiante ne soit pas phosphatée, on dira que c'est seulement qu'elle n'est plus phosphatée parce que le phosphate d'abord disséminé dans sa substance s'est concentré dans les granules. Et, si l'on s'étonnait que toutes les craies ne renfermassent pas de semblables concrétions, on rappellerait que toutes les craies ne sont pas davantage chargées de silex.

En somme, malgré la concision des observations précédentes, je crois avoir montré que le mode de formation des phosphorites sédimentaires ne comporte plus aucun point douteux. Leur histoire sera citée parmi celles qui démontrent le mieux l'incessante activité des circulations souterraines et les triages, tantôt chimiques et tantôt purement mécaniques, qui en sont la conséquence. Avant tout, le phosphate de chaux s'est constitué dans les crevasses profondes du sol primitif par des réactions filoniennes, dont les éléments comme les énergies provenaient du laboratoire infragranitique. La décomposition des

1. Stanislas Meunier, *Le Naturaliste* du 15 août 1896.

roches cristallines, continuée de nos jours. par exemple, en Auvergne, au profit du sol de la Limagne, a mis l'apatite sous une forme où les forces biologiques ont pu y puiser, et les premiers organismes, dès l'apparition de la vie, ont su fixer du phosphore dans leurs tissus. La décomposition des matières animales ainsi formées a donné naissance à des phosphates complexes dérivant pour une part au moins de l'activité microbienne, et les solutions salines résultantes ont réagi sur les calcaires, de façon à concrétionner dans des localités convenables des granules ou des rognons de phosphorite. Plus tard, dans un certain nombre de localités, le grand phénomène de la décalcification des sédiments sans lesquels les fonctions superficielles ne sauraient s'accomplir et qui, par conséquent, est en cours ininterrompu depuis l'origine jusqu'à maintenant, a concentré à de certains niveaux les matériaux relativement insolubles pour les constituer en gîtes industriellement exploitables. Au terme du lessivage, ces gîtes ont pu acquérir une disposition régulière comparable à celle des sédiments tout à fait récents, c'est-à-dire de ceux qui n'ont pas subi les modifications internes dont tous les dépôts sont rapidement le théâtre. Parfois, à la faveur de dissolvants plus énergiques, les gîtes une fois constitués ont pu eux-mêmes être remaniés et c'est à la suite des dissolutions secondaires que se sont faits les revêtements nacrés de certaines poches de Beauval et d'Hardivillers, et sur une échelle bien plus grande la concrétion en choux-fleurs des phosphorites du Quercy.

Comme on le voit, tout se tient avec cette manière de voir qui contraste avec les théories si compliquées et j'ajouterai si naïves, qui veulent que tous les éléments d'une couche donnée soient précisément de l'âge de cette couche, et qui en conséquence doivent supposer dans le bassin de sédimentation, des conditions toutes différentes de celles qu'on observe aujourd'hui.

A la suite de cette histoire des phosphorites sédimen-

taires, je placerai en constituant comme un exact pendant celle que j'ai été amené à faire du minerai de fer oolithique de Lorraine.

Le résultat auquel je suis parvenu est diamétralement opposé à celui que l'on professe généralement et par exemple à l'opinion de M. G. Rolland qui, le 18 février 1901, a fait à l'Académie des sciences une communication dont la conclusion est que les couches de minerai de fer



FIG 19. — Coupe mince montrant au grossissement de 80 diamètres la structure du minerai de fer oolithique des environs de Nancy

oolithique de l'arrondissement de Briey se sont constituées au fond de la mer toarcienne, les courants ayant distribué là où on les trouve les oolithes ferrugineuses¹ (fig. 20).

L'opinion qui se déduit des faits et que j'ai développée naguère dans mon cours du Muséum d'Histoire naturelle, c'est, d'une part, que les couches aujourd'hui exploitées comme minerais de fer n'étaient point, lors de leur dépôt, constituées par de la limonite et, d'autre part, que la structure oolithique du terrain ne s'est produite que très postérieurement à la sédimentation. En d'autres termes,

1. *Comptes rendus*, t. CXXXII, p 444

l'histoire de ces gisements témoigne énergiquement, comme bien d'autres, de l'incessante activité dont la profondeur du milieu géologique est le théâtre.

Il ne faut pas oublier d'abord que, dans certains points, les couches de minerais oolithiques sont chargées de fossiles et que les oolithes de limonite se rencontrent jusque dans les cavités des coquilles. Or, peut-on s'imaginer la vie de ces animaux, dont les vestiges sont si nombreux, dans une mer chargée de boue ferrugineuse et dont les courants auraient été assez forts pour charrier les oolithes jusqu'à une énorme distance. C'est pourtant cette supposition bizarre qu'adoptait encore en 1889 M. Villain¹, qui admettait que des failles ont déversé dans la mer toarcienne des torrents de carbonate de fer dissous dans l'acide carbonique. D'après lui, au contact de l'eau de la mer, la sidérose se serait décomposée en très grande partie et l'oxyde de fer précipité aurait été entraîné par les courants dans le bassin de sédimentation. Au cours du dépôt qui s'est effectué ensuite, l'oxyde de fer se serait séparé de la masse sédimentaire à l'état d'oolithes.

Rappelons d'ailleurs qu'il ne s'agit pas d'un phénomène local, mais de formations qui s'étendent sur des surfaces considérables, aussi bien dans le Sud du Plateau central et dans l'Aveyron qu'au Nord et en Lorraine. En outre, on constate très souvent que le test des Mollusques est constitué lui-même par de la limonite, et cela tranche la question, puisqu'on ne saurait supposer que ces coquilles n'ont pas été chimiquement identiques aux coquilles de mêmes espèces qu'on trouve au même niveau géologique dans les strates non ferrugineuses.

Les couches qui nous occupent se présentent pour moi comme des produits de transformation sur place, sans altération notable de leur structure, de couches antérieurement calcaires, comme celles qui se rencontrent à tant

1. *Comptes rendus*, t. CXVIII, p. 1291.

de niveaux du terrain jurassique. Qu'on prenne des fragments de calcaire oolithique fossilifère et qu'on les arrose pendant un temps suffisant avec une solution étendue de sulfate de fer, puis qu'on examine, au microscope, des lames minces préparées au travers de sa substance, et l'on verra les débuts et les progrès d'une *ferruginification* qu'il est très intéressant de suivre. Celle-ci est identique dans son principe à la *silicification*, à laquelle se rattachent, par exemple, les gisements de meulières des terrains tertiaires parisiens, où l'on retrouve, avec une composition nouvelle, tous les détails de structure (y compris les fossiles) de couches antérieurement tout autres et qui pouvaient être calcaires.

Quant à la forme oolithique des masses considérées, elle n'a certainement rien de commun avec celles du dépôt initial, et il suffit d'étudier de près les oolithes des calcaires jurassiques pour en être convaincu. Elles aussi contiennent fréquemment des débris de fossiles et elles affectent tous les caractères de produits longtemps concrétionnés.

Il faut reconnaître cependant que cette manière de voir rencontre à première vue des objections qui paraissent graves. La principale est d'ordre chimique et concerne la composition des oolithes de limonite. Quand on les laisse digérer dans l'acide chlorhydrique moyennement concentré à la température ordinaire, on les voit, au bout de quelques jours, se décolorer presque complètement sans perdre leur forme, pendant que le liquide dissout tout le fer. Il reste des globules gris, d'apparence argileuse, dont on ne voit pas les correspondants dans les calcaires oolithiques regardés tout à l'heure comme milieu générateur des oolithes ocreuses.

Mais un examen plus approfondi de la question lève cette difficulté d'une façon complète et qui m'a vivement intéressé. On reconnaît, en effet, que la matière grise argiloïde qui vient d'être mentionnée n'est pas de l'argile,

malgré son apparence, et consiste, à part son mélange avec du sable, en hydrate d'alumine à peu près pur ; c'est une variété de bauxite et sa rencontre en pareil gisement est tout à fait digne d'attention, étant donné que cette substance manifeste avec la limonite des traits multiples d'affinité au point de vue géologique¹. On sait, en effet, par exemple, que le calcaire est tout aussi apte à précipiter l'alumine que le fer de ses dissolutions salines. De sorte que si un fragment de calcaire est plongé dans une dissolution de sulfate d'alumine, il se fait un précipité d'alumine, il se dissout du sulfate de chaux et il se dégage de l'acide carbonique.

Tout cela posé, voici comment il paraît légitime de reconstituer l'histoire des couches à oolithes ferrugineuses : Tout d'abord, la mer toarcienne a déposé des assises de limon calcaire plus ou moins argileux et sableux, parfois presque pur, dans lequel étaient ensevelis les coquilles et les autres vestiges des animaux marins habitant le bassin aqueux. Dans un second temps, et en conséquence des mouvements moléculaires dont la masse a été le siège, il est devenu oolithique : le calcaire s'est arrangé autour de certains centres, grains de sable ou autres objets, et les matières autres que le calcaire, argile, etc., ont été refoulées dans les interstices des oolithes. Enfin, dans un troisième temps, la formation a été baignée, sans doute très lentement, par des eaux contenant des sels solubles de fer et d'alumine et qui pouvaient n'en renfermer que des traces². Les molécules de calcaire ont été comme des

1. Il est intéressant de rappeler à cette occasion que c'est dans le minerai de fer du Fouta-Djallon au Sénégal et, par conséquent, dans la *latérite* que Berthier a découvert la bauxite pour la première fois (*Annales des Mines*, 1^{re} série, t. V. 1820, p. 133, et t. VI, 1821, p. 531). Le même savant a reconnu, en 1828, l'hydrate d'alumine dans le fer en grains (*Annales des Mines*, 2^e série, t. III, p. 241).

2. On sait que l'aluminium existe dans un très grand nombre d'eaux minérales ; celles de Saint-Nectaire, par exemple, en contiennent de 0^{sr},017 à 0^{sr},023 par litre, On connaît des sources volcaniques qui en sont beaucoup plus riches et où l'aluminium est à l'état de sulfate.

pièges, arrêtant au passage ces matières métalliques, et il y a eu une épigénie progressive de tout le terrain qui, tout en conservant les traits principaux de sa structure et jusqu'à ses fossiles, s'est ferruginisé et aluminisé ; il est passé à l'état de minerai de fer oolithique par rubéfaction de sidérose d'abord produite.

Les confirmations de cette hypothèse pourraient être réunies en grand nombre. Citons spécialement celle qui résulte de l'analyse chimique des limonites de Lorraine et des contrées analogues.

On y dose très souvent l'alumine en quantité disproportionnée à la silice dans la supposition qu'elles ne contiendraient que de l'argile. Dans la mine de Frouard, j'ai trouvé jusqu'à 13 d'alumine pour 8 de silice, soit plus de 60 pour 100 d'alumine au lieu de 25 ou 26 pour 100 que contiennent les argiles. Des analyses publiées de la limonite de Chavigny et de Lay-Saint-Christoffe donnent 10 et 14,29 d'alumine contre 3,70 et 5 de silice — et l'on pourrait multiplier indéfiniment ces exemples. Ajoutons qu'une bonne partie de la silice dont il s'agit est à l'état de sable quartzéux et par conséquent doit encore être diminuée de celle entrant dans la composition d'un silicate argiloïde. Enfin, il est clair que le calcaire, qui est devenu limonite par épigénie, pouvait être plus ou moins argileux et son argile subsiste après la transformation. C'est ce qui explique les différences présentées par les analyses des diverses variétés de limonite oolithique.

Une autre remarque concerne la dimension et la forme des oolithes ferrugineuses comparées aux oolithes calcaires :

Elles sont d'ordinaire plus petites et moins sphériques, étant aplaties dans le sens de la stratification. Il est évident que la substitution de la sidérose ou de la limonite, dont la densité est 3,8, à la calcite qui pèse 2,7 ne peut se faire sans déterminer, dans la masse qui en est le siège, une contraction notable et par suite un tassement dont

la forme aplatie des oolithes ferrugineuses est comme un reflet.

Un poids donné de carbone (6 grammes par exemple) passe de la substance de 50 grammes de calcite initiale, qui occupait 18^{cc},5, dans celle de 58 grammes de sidérose qui occupe seulement 15^{cc},2. Le rapport de ces deux capacités, ou 0,821, représente la contraction de chaque unité de volume de la couche, qui est d'un tiers environ.

Comprise ainsi, la genèse des assises de limonite oolithique de Lorraine constitue un paragraphe de l'histoire des transformations successives auxquelles les couches du sol sont en proie d'une manière continue.

Bien d'autres questions pourraient être traitées de la même manière et, dans le nombre, on peut citer la houillification. Une école de géologues, ayant à sa tête le très savant M. Bernard Renault, cherche à défendre cette opinion que la houille date de l'époque houillère et que les microbes qui vivaient alors en sont les auteurs. En laissant de côté le point de vue biologique que nous examinerons ailleurs, nous devons dire dès maintenant que l'allure générale de la houille ne paraît pas cadrer avec cette opinion et nous semble plaider bien plus éloquemment en faveur de la thèse activiste, qui en fait un produit à chaque instant changeant par suite des progrès incessants d'une véritable distillation qui se continue dans les profondeurs du sol.

Parmi les arguments qui paraissent décisifs, un seul sera cité ici : c'est la présence du gaz hydrogène carboné dans la masse des combustibles dont la structure est convenable et qui déterminent si fréquemment les lamentables accidents dits coups de grisou. Ce gaz, est en grande partie, ce qui manque au combustible pour être encore de la matière végétale vivante : c'est donc, en grande partie, ce que le microbe aurait dû enlever à cette dernière pour en faire de la houille. Mais si cette soustraction s'était faite avant l'enfouissement, le gaz n'aurait pu être retenu dans la masse et se serait dégagé dans l'atmosphère. Sa persistance dans le

combustible prouve que la transformation s'est faite après le recouvrement par les massifs épais. Il est évident qu'elle se continue encore dans le sol et achemine progressivement la houille vers les états plus avancés d'antracite et de graphite.

Cette remarque est d'ailleurs d'autant plus légitime que la houillification, loin d'être un phénomène d'une catégorie particulière, n'est qu'un détail du métamorphisme général, qui se rattache comme à sa cause à la circulation de l'eau souterraine profonde.

Ce métamorphisme, à l'inverse de ce que l'on a cru d'abord; se montre comme étant essentiellement continu. Dès qu'un dépôt est constitué au fond de la mer, il commence la série des transformations qui, dès qu'elles seront un peu plus accusées, seront considérées nettement comme de nature métamorphique. C'est par des nuances absolument insensibles que ce dépôt se relie à ceux des anciennes formations qui semblent en différer le plus et pour l'explication desquelles on aurait cru d'abord nécessaire d'imaginer des causes extraordinaires.

Le métamorphisme général est le chapitre où se manifeste le mieux la légitimité de la doctrine activiste et pour en justifier l'opportunité il suffirait de rappeler ce qu'on lit par exemple, dans un volume de Daubrée publié en 1867 sous ce titre : *Rapport sur les progrès de la Géologie expérimentale*.

A la page 90, on trouvera ce passage : « Ce sont les couches les plus anciennes qui accusent le plus fortement cette action : de telle sorte que la cause qui l'a produite paraîtrait s'être affaiblie avec le temps et avoir possédé vraisemblablement, avant la période pluvieuse, une énergie considérable ».

Il n'est pas inutile de remarquer aussi que la décalcification souterraine ne suppose pas nécessairement l'intervention des eaux météoriques, quoique celles-ci soient d'habitude les plus faciles à observer. Nous savons en

effet que bien des causes peuvent charger d'acide carbonique des eaux déjà circulant dans les profondeurs. La preuve suffisante en est dans le nombre des eaux incrustantes, édifiant au jour des accumulations parfois énormes de travertins qui nous apparaissent comme la contre-partie de soustractions égales, réalisées dans la masse des roches. Cette remarque montre que la décalcification ne suppose pas nécessairement l'émergence préalable au-dessus du niveau de la mer des roches qui la subissent. Nous avons d'ailleurs des témoignages bien éloquents de l'activité avec laquelle les eaux souterraines enlèvent aux roches de la matière calcaire, dans le volume considérable des travertins qui se déposent en tant de lieux, même loin de toute manifestation volcanique ou hydrothermale. Par exemple, dans le canton de Vaud, au-dessus de Vevey, vers Glion et Blonay, vers les Avants, des surfaces énormes sont recouvertes de travertins fontigéniques. On en a constaté à des âges géologiques très variés.

Il n'est pas surprenant qu'à mesure que l'âge d'un sédiment augmente, la proportion de ses éléments calcaires aille progressivement en diminuant. Dans le silurien inférieur, les schistes et les quartzites l'emportent beaucoup comme masse sur les marbres et dans l'archéen, le calcaire (cipolin) a subsisté juste assez pour démontrer le rôle considérable qu'il a joué à l'origine.

4 — LA FONCTION AQUEUSE SUPERFICIELLE PENDANT LES TEMPS GÉOLOGIQUES

C'est avec un intérêt tout particulier qu'on retrouve pour des époques antérieures à la nôtre le témoignage de la fonction aqueuse superficielle, et, comme on va le voir, l'étude qu'on en peut faire vient éclaircir deux questions tout à fait capitales : celle de la détermination du faciès continental et celle de la notion du mécanisme en vertu

duquel depuis les temps pliocènes, au moins pour nos régions, s'est accompli le creusement des vallées. Chacune de ces questions se rapporte à l'une des deux portions dans lesquelles nous avons réparti la nappe d'eau superficielle de l'époque actuelle, c'est-à-dire d'une part ce qui en est caché aux yeux dans la substance des matériaux perméables de la surface du sol, et d'autre part ce qu'on en voit s'écouler dans le lit des rivières et des fleuves.

A cet égard il est indispensable de se remettre devant l'esprit le résultat le plus sensible de l'action des eaux sauvages à la surface du sol. Le ruissellement sur les pentes très accentuées de l'eau de la pluie donne des systèmes de sulcatures de l'effet le plus remarquable et dont la figure 20 donne un exemple bien caractérisé. Il est emprunté à la géographie d'un point du canton de Vaud, dit En Saumont et qui est situé sur la rive gauche de la baie de Clarens qui descend dans le lac de Genève entre Vevey et Montreux. Il y a dans cette localité plus de 150 mètres d'épaisseur d'un terrain très délayable et qui est plaqué sur le flanc de la montagne avec une pente de 50° environ. On y voit des rigoles disposées très régulièrement par le fait du ruissellement des eaux sauvages.

La figure 21, empruntée au même pays fait voir comment, même dans des roches bien cohérentes, la continuation suffisamment prolongée du même phénomène peut amener de profonds changements dans le relief du sol. Les eaux se sont peu à peu réunies en un torrent sur le versant Sud-Ouest de la montagne des Pléiades, près de Vevey, et il en est résulté un ravin profond, qui se creuse sans cesse et qui remonte sa source sans arrêt. Il en résulte la certitude d'une prochaine division de la montagne jusqu'ici unique en deux montagnes voisines. C'est un jour très important jeté sur l'histoire des eaux dans les montagnes et nous aurons à y revenir un peu plus loin à l'occasion de la fonction glaciaire.

Il faut remarquer en outre que la circulation de l'eau torrentielle a amené souvent dans le passé des renversements complets dans le relief relatif de points voisins de

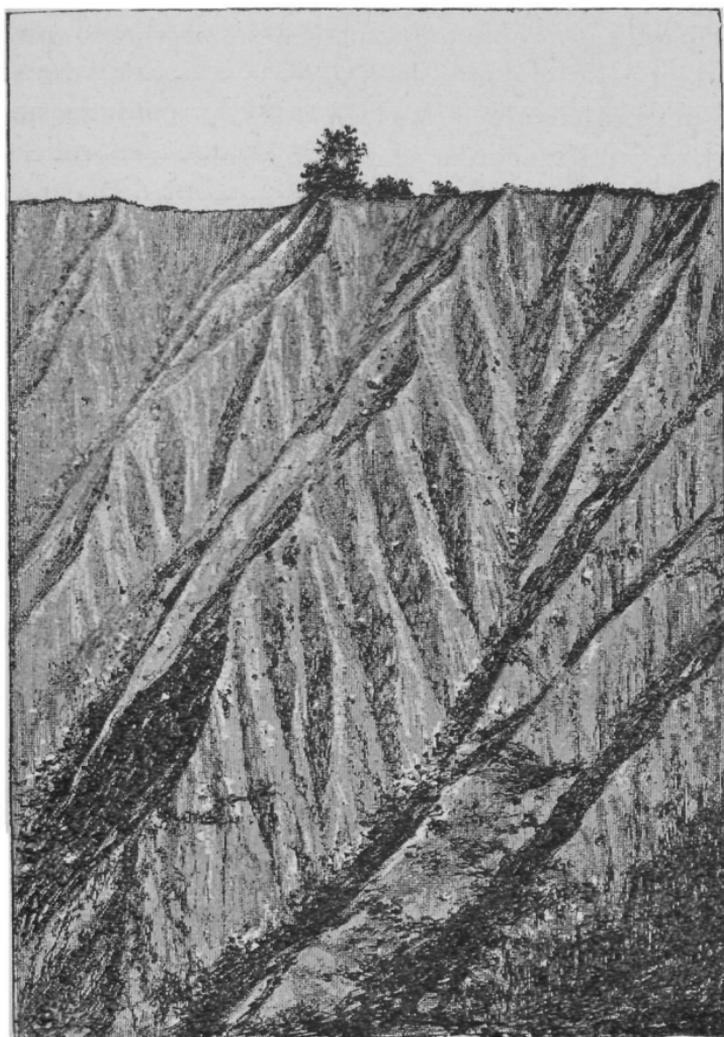


FIG. 20 — Mouvements produits par les eaux sauvages dans le terrain superficiel d'En Saumont, près de Vevey en Suisse.

la surface. Nous aurons à revenir plus loin sur des faits de ce genre et à citer des localités où l'on voit par exemple une coulée volcanique qui recouvre une masse épaisse

de graviers fluviatiles, l'ensemble étant entaillé par la rivière actuelle sous la forme d'une haute falaise. Il est clair que lors de l'écoulement de la lave, les graviers recouverts par cette lave volcanique, tapissaient le fond d'une vallée dont la rivière fut rejetée dans une nouvelle direction. Depuis lors le placage de roche éruptive a constitué une protection très efficace du sol contre les entreprises de l'intempérisme et non seulement les reliefs qui bordent la coulée à droite et à gauche ont disparu, mais la rivière s'est creusé une vallée à l'emplacement même des collines précédentes. Cet exemple à côté duquel on peut en noter bien d'autres, où n'interviennent pas les roches volcaniques mais simplement la rencontre par l'érosion de boues spécialement neutres, est extrêmement riche en enseignements.

Au premier point de vue, l'étude de la nappe superficielle nous amène inévitablement à signaler un mode particulier de sédimentation d'où dérivent des couches constitutives du sol, et qui, selon moi, n'a pas appelé suffisamment l'attention.

Il faut, ainsi qu'on va le voir, lui rattacher comme à sa cause originelle une série de formations intéressantes par leurs caractères géologiques, et souvent précieuses par leur valeur industrielle. Ce procédé se réalise dans la masse de terrains déjà constitués et par le jeu des eaux de circulation qui enlèvent certains éléments du sol et groupent les résidus sous une forme nouvelle. Il s'est accompli dans maintes localités, concentrant souvent des matériaux exploitables et donnant un moyen, très digne d'attention, de diagnostiquer le faciès continental pour diverses époques relativement auxquelles on était jusqu'ici fort dépourvu à cet égard.

Avant de décrire, en peu de mots, le phénomène dont il s'agit, il paraît tout à fait indispensable de faire disparaître un malentendu que j'ai déjà eu à combattre dans des circonstances analogues. Certaines personnes, en ef-

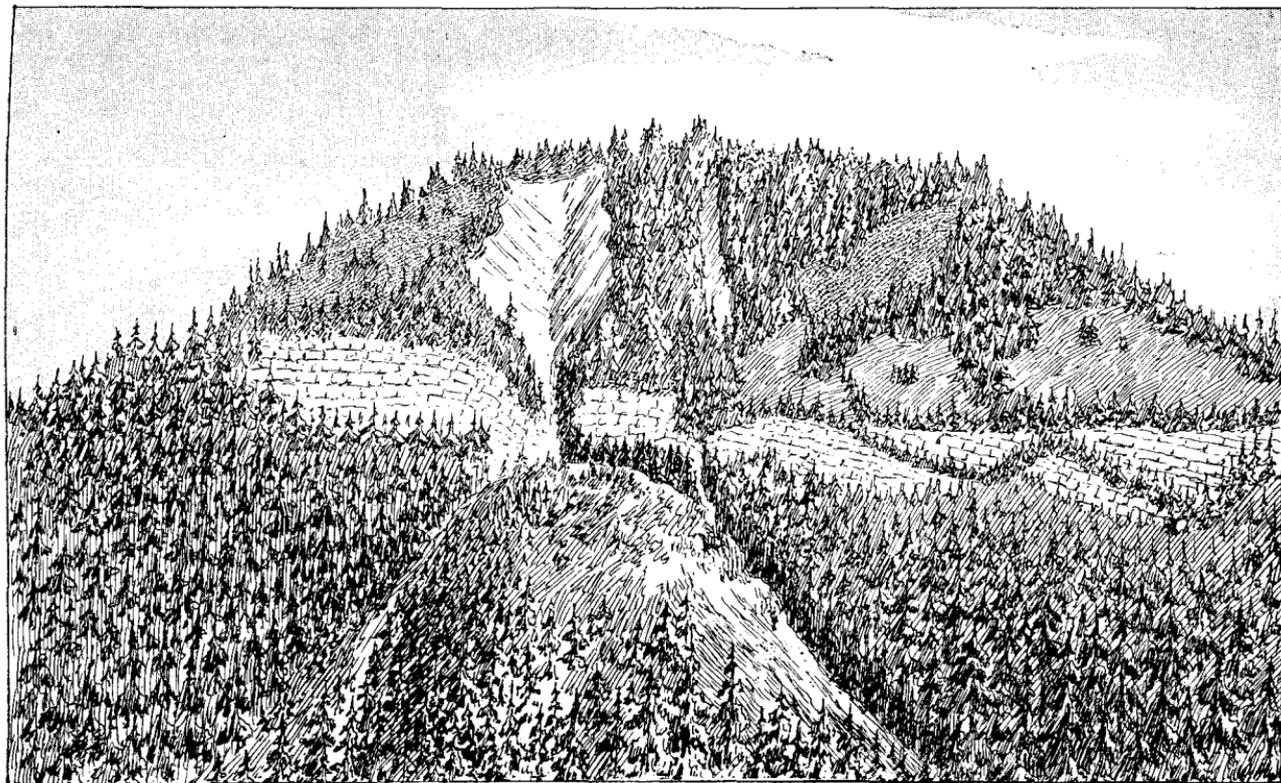


FIG 21 — Le ravin des Chevalleyres qui par son approfondissement progressif amène la division en deux sommets de la montagne des Pléiades auprès de Vevey.

fet, qui n'ont pas suffisamment réfléchi, refusent la qualité sédimentaire à ces résidus d'une dénudation souterraine. Il est cependant bien aisé de faire sentir que les conditions essentielles en sont identiques à celles qui accompagnent une sédimentation ordinaire. Par exemple, nous allons voir que l'attaque souterraine de la craie blanche par des eaux d'infiltration peut donner lieu, à une distance plus ou moins grande de la surface du sol, à 10, 15, 20 mètres au delà, à une couche de sable quartzeux. Je dis que ce sable résulte d'une sédimentation tout aussi nette que celle qui donne lieu au sable de la plage de Dieppe par la dénudation marine de la falaise crayeuse. Des deux parts, en effet, la matière siliceuse est contenue dans la roche qui subit la dénudation, associée à une masse bien plus volumineuse de matériaux différents ; des deux parts, l'agent de sédimentation, qui est la mer dans un cas et l'eau souterraine dans l'autre, se borne à soustraire les matériaux délayables ou solubles. Il n'y a pas de différence essentielle et l'on peut s'étonner qu'un géologue comme M. J. Cornet, président de la Société de géologie de Belgique, ait professé une opinion différente¹.

Ceci étant posé, il importe beaucoup de montrer que la sédimentation souterraine prend dans la nature une dimension bien supérieure à celle qu'on serait tout d'abord porté à lui attribuer. Pour fixer les idées à ce sujet, je crois utile de commencer par la description d'une coupe (fig. 22) que j'ai pu étudier avec détail aux environs de Mortagne, dans le département de l'Orne.

Au-dessous de la terre végétale se présentent, dans cette région, des argiles que tout le monde est d'accord pour considérer comme un résultat de la décalcification de la craie sous l'influence des eaux météoriques : c'est l'argile à silex si constante sur tous les sols crayeux et relative-

1. *Annales de la Société géologique de Belgique*, t. XXVII, p. LXIX, 1900.

ment à laquelle je n'ai que peu de chose à ajouter. C'est une terre ocreuse tachée par places de parties blanchâtres. Son grain est fort grossier, fort irrégulier. Elle donne, par la dessiccation, des mottes résistantes.

On y rencontre en abondance des rognons de silex de toutes les tailles, depuis quelques centimètres cubes jusqu'à plusieurs fois le volume de la tête ; ils méritent une mention, à cause des conclusions dont leurs caractères sont susceptibles au sujet même du mode de formation et de l'origine du terrain qui les contient.

Rappelons tout d'abord, qu'on est très frappé de leurs formes qui sont exactement celles des rognons de silex qu'on peut extraire des bancs de craie blanche, à Meudon, par exemple, et pour citer une localité connue de tout le monde. Ces formes, à contours arrondis, mais très capricieuses, et souvent très branchues, excluent évidemment toute idée de charriage ou de transport par les eaux à longue distance. La craie blanche n'existant pas dans

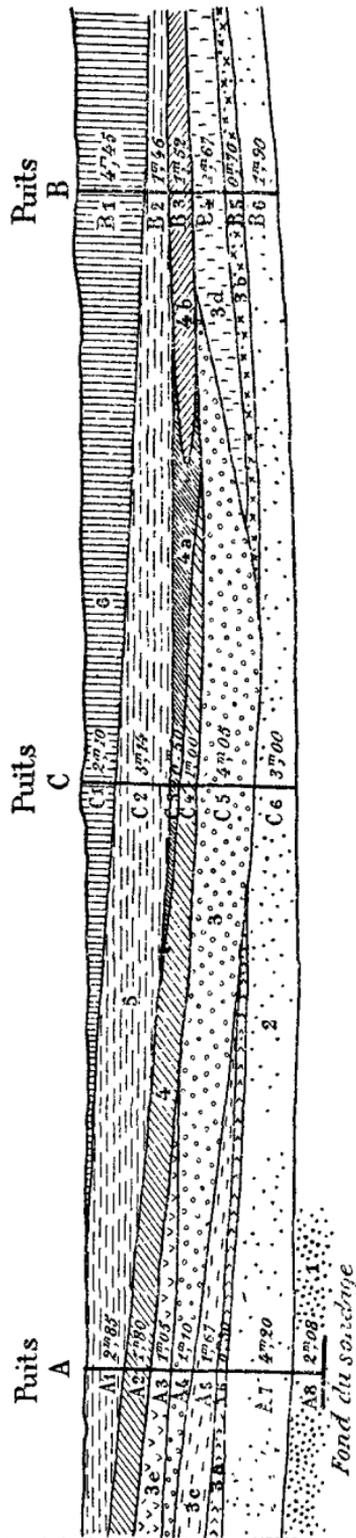


FIG 23. — Coupe de la colline de Prépotin, aux environs de Mortagne (Orne).

la région, on est forcément conduit à admettre que l'argile et le silex qu'elle contient représentent le résidu laissé sur place par la dissolution d'assises crayeuses qui existaient au point considéré, dans un passé géologique, et dont la disparition progressive a amené de très profondes modifications dans le relief primitif du pays.

D'un autre côté, ces silex, tout branchus qu'ils soient restés, ont subi, depuis leur concrétion première, de très intenses modifications et on constate qu'ils sont devenus poreux et légers par la dissolution de toute leur portion hydratée : les eaux d'infiltration les ont *épuisés* en même temps qu'elles emportaient la portion calcaire du sol.

D'ailleurs, l'intensité de l'épuisement varie d'un rognon de silex à un autre, et le fait s'explique de lui-même par la différence de composition de ces concrétions, les unes possédant une proportion de silice anhydre plus grande que les autres, ainsi que le démontre l'analyse.

Cette couche atteint, en certains points, une épaisseur supérieure à 2 mètres : elle est par place plus ocreuse que dans le type décrit, et cela tient à la pénétration, dans le sol, de limons ferrugineux fournis par la surface et entraînés par les eaux météoriques. Sa limite inférieure est parfaitement réglée et oblique par rapport à la surface du sol, laquelle n'est pas très éloignée d'être horizontale.

Au-dessous, se présente une autre argile qui peut avoir jusqu'à 3^m, 15 d'épaisseur et qui se distingue tout d'abord par sa nuance plus claire, presque blanche, qui annonce l'absence presque complète de l'oxyde de fer. Elle est assez fortement mélangée de sable où brillent des paillettes micacées. De gros silex se montrent de toutes parts avec les formes des rognons de la craie et souvent traversés de fissures planes qui les débitent en fragments plus ou moins anguleux. Ils sont très inégalement épuisés par le procédé déjà indiqué et quelquefois ils le sont d'une façon tellement complète qu'ils sont presque méconnaissables et qu'on pourrait les confondre, une fois brisés, avec l'argile

qui les emballe. Certains d'entre eux sont devenus presque friables et se transforment très facilement en une poussière entièrement formée de silice anhydre, abandonnant fort peu de son poids à la lessive bouillante de potasse. J'en ai examiné des lames minces au microscope et j'y ai reconnu la présence de vestiges fossiles et spécialement des tests de *Biloculina*.

Cette argile à silex blanche n'est pas partout recouverte par l'argile ocreuse; en quelques régions elle fait la surface du sol; comme l'argile, elle résulte évidemment d'un lavage sur place, et sans aucun charriage, d'un massif crayeux dont toute la substance calcaire a été extraite en même temps que toute la substance hydro-siliceuse.

Plus bas que les deux niveaux d'argile à silex, ocreuse ou blanche, qui viennent d'être mentionnés, nous avons distingué un lit de 2 mètres et plus d'épaisseur d'une argile sans silex et qui çà et là, est remarquable par sa blancheur et sa pureté qui en font une véritable *terre de pipe*. Sa cassure est crayeuse et montre de divers côtés de très petits grains de quartz et de rares paillettes de mica. Le lit passe, en certains endroits, à une argile rosée plus ou moins foncée.

La liaison de cette formation de terre de pipe avec les lits précédents. l'absence totale de tout élément soluble dans sa masse, conduisent à la regarder sans hésitation comme un produit de dissection subi par une masse crayeuse non silicifère et qui gisait au-dessous de la craie à silex. On remarquera que, s'il en est réellement ainsi (et c'est ce que nous allons démontrer), cette argile sans silex, plus profonde que les argiles à silex, est d'âge moins ancien. Elle n'a pu se constituer petit à petit par décalcification, qu'après la décalcification des masses superposées, et cela est un point qui va prendre encore plus de signification par la suite de ces études.

Dans les coupes que j'ai relevées, on reconnaît que les assises d'argiles déjà décrites sont partout supportées par

des couches sableuses que nous allons énumérer. Remarquons tout de suite que, dans le pays, les couches turo-niennes en place se signalent par des horizons de craies plus ou moins argileuses et marneuses, et par des niveaux de craies sableuses ou micacées : l'opinion que les sables comme les argiles sont des produits de lavage souterrain en sera fortement appuyée; quelques détails suffiront pour le démontrer.

Les sables sur lesquels reposent les argiles précédentes sont parfois d'une blancheur parfaite; en d'autres points, plus ou moins jaunâtres, çà et là ocreux ou même cimentés en grès ferrugineux plus ou moins durs et imperméables (*grison*). Le sable blanc peut atteindre et dépasser 4 mètres de puissance; il est riche en paillettes de mica, on y trouve 13 à 15 pour 100 d'argile blanche en mélange très intime, mais toute trace de calcaire y fait absolument défaut. Dans les points où il est coloré, le sable est mélangé d'une proportion d'argile qui peut s'élever à près de 50 pour 100.

Une particularité qui le rend spécialement intéressant, c'est qu'il renferme des fossiles en certaines régions. A première vue, cette circonstance peut sembler incompatible avec l'idée déjà exprimée que ce sable résulte d'une décalcification souterraine; mais la difficulté disparaît dès qu'on a constaté que les tests de mollusques dont il s'agit sont entièrement silicifiés et ont pu, par conséquent, résister sans peine aux agents de dissolution qui ont fait disparaître tous les éléments calcaires du sous-sol.

En venant d'en haut, un premier niveau fossilifère est caractérisé par l'abondance des coquilles d'*Ostrea columba* de la variété *gigas*, qui est propre aux assises turo-niennes. Ces coquilles sont remarquables par plusieurs caractères. D'abord, on voit tout de suite qu'elles sont comme corrodées et ont perdu beaucoup de leurs dimensions originelles. Une fois lavées et surtout pendant qu'elles sont encore humides, elles sont translucides comme de la cal-

cédoine. A leur surface se montrent, en très grand nombre, ces concrétions spéciales qui, depuis bien longtemps, ont été désignées sous le nom d'*Orbicules siliceuses* (fig. 23). Ce sont comme des disques de silex à zones concentriques, quelquefois conjugués et enveloppés à deux, à trois ou à un plus grand nombre, dans de nouvelles lignes qui forment un nouveau système autour des autres. En outre, l'épaisseur des valves est quelquefois évidée, les deux épidermes interne et externe ayant seuls persisté, et alors l'intervalle qui les sépare est fréquemment converti en véritables géodes où se dressent de petits cristaux de quartz de formes variées. Des explications complémentaires



FIG 23 — Orbicules siliceuses à la surface d'un test silicifié d'*Ostrea Columba* des environs de Prépotin (Orne)

à cet égard ne seront aucunement étrangères à notre sujet car elles concernent, sans doute possible, un chapitre de la sédimentation souterraine. La constitution du quartz par voie de concrétion et au travers des étapes caractérisées par l'opale et la calcédoine est un phénomène dont l'importance est bien plus grande peut-être qu'on ne le croit généralement. En effet, une partie des sables dont nous allons parler a certainement cette origine primitive par voie de concrétion, de telle sorte que les grains siliceux et quartzeux trouvés dans les diverses variétés de roches calcaires ont quelquefois fourni un appui apparent, et que nous pouvons contester maintenant, à la théorie terrigène de leur génération.

Cette remarque s'applique tout spécialement à la craie qui malgré sa ressemblance si intime avec les dépôts

actuels des abîmes sous-marins, a été considérée quelquefois comme une production de faible profondeur à cause des grains de quartz et d'autres minéraux que les acides permettent d'en dégager. Pour le quartz, nous voyons qu'il peut être engendré dans l'épaisseur même des tests de coquilles et je pourrais donner à cette occasion de longs développements qui m'ont été procurés par l'étude approfondie de certains fossiles et spécialement des coquilles du grand *Inoceramus Cuvieri* et de l'*Ananchytes gibba*.

J'ai trouvé en étudiant ces fossiles chimiquement et au microscope que l'épaisseur de leur test a fourni au quartz un milieu spécialement favorable à sa concrétion et que la structure organique est intervenue pour faciliter inégalement la production minérale dans les différents points. Il en est résulté que des rosettes siliceuses et quartzzeuses jalonnent pour ainsi dire dans certains cas l'anatomie du mollusque ou de l'oursin et c'est ce qu'on peut mettre en évidence d'une façon très élégante en attaquant les fossiles avec un acide étendu (Voir fig. 24 et 25).

La relation de la production quartzzeuse avec l'histologie des Inocérames s'est révélée d'une façon spécialement frappante dans des coupes minces, taillées les unes parallèlement et les autres perpendiculairement aux fibres constitutives des coquilles et examinées dans la lumière polarisée (fig. 26 et 27). A ce titre on peut dire que l'origine même de certaines variétés minéralogiques du quartz sur lesquelles l'attention a été appelée dans ces dernières années est en définitive du domaine biologique puisqu'elle dérive de la structure de produits animaux.

Dans tous les cas on comprend très bien que les coquilles très partiellement silicifiées subissant dans le sol des actions mécaniques consécutives, par exemple, aux affaissements locaux, se désagrègent, se concassent, pour prendre notamment l'apparence des débris d'Inocérames dans la couche de craie dite « banc des Soies » dans le département du Nord, qui n'est qu'un acheminement vers la libération de

gravins ayant l'apparence arénacée. Ces coquilles silicifiées sont, d'ailleurs, très fragiles, et il a dû arriver à beaucoup d'entre elles de se réduire en une poussière qu'on a dû

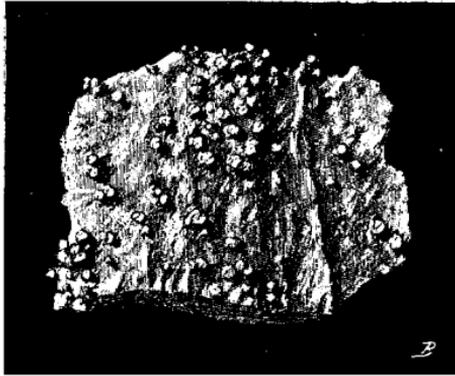


FIG. 24 — Test d'*Inoceramus Cuvieri* attaqué par l'acide chlorhydrique et montrant les concrétions siliceuses et insolubles dont il est rempli Moitié de la grandeur naturelle.

nécessairement prendre pour un sable charrié par les anciennes eaux tandis que son origine est, comme on le

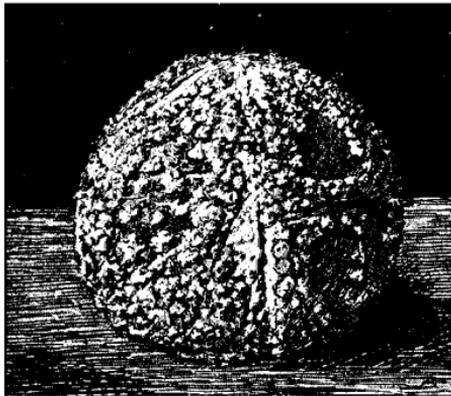


FIG. 25 — Test d'*Ananchytes gibba* attaqué par l'acide chlorhydrique et montrant les concrétions siliceuses et insolubles dont il est rempli Moitié de la grandeur naturelle

voit, essentiellement différente. Évidemment, ces sables renfermant par places les débris de l'*Ostrea columba*, sont des résidus de la décalcification souterraine d'assises

crayeuses dépendant de l'époque turonienne. Leur séparation comme assise distincte, c'est-à-dire leur constitution à l'état de sédiment, est de date moins ancienne que celle



FIG 26 — Coupe mince d'Inocerame taillé parallèlement aux fibres et vue au microscope au grossissement de 80 diamètres

de l'isolement des argiles qui les couronnent et il faut les comprendre dans les assises de production postérieure à



FIG 27 — La coupe de la figure précédente vue dans la lumière polarisée entre les nicols croisés On y voit que la portion qui paraissait vide dans la lumière naturelle est en réalité occupée par du quartz qui a épigénisé le test de la coquille 80 diamètres.

la dernière émergence de la région. C'est un point sur lequel on ne saurait trop insister, car tout le monde n'est pas disposé à l'accepter sans discussion. Même, comme on l'a vu plus haut, un géologue distingué, M. Cornet,

récemment président de la Société géologique belge, a contesté formellement que des formations de ce genre puissent être considérées comme représentant des terrains vraiment stratifiés. Suivant lui, de simples résidus de dissolution de la craie ne sauraient mériter cette appellation. Je persiste à croire que, quand on aura impartialement réfléchi à cette très intéressante question, on reconnaîtra que ces objections n'ont aucune portée sérieuse.

Il suffit, pour faire la lumière sur ce point, de comparer l'état des choses que nous venons de décrire avec ce que présente une localité où la mer vient battre le pied d'une falaise de craie. Dans les deux cas, la roche crayeuse est détruite et sa portion calcaire lui est arrachée, emportée, à Mortagne, à l'état de dissolution, à Dieppe ou au Havre à l'état de limon fin suspendu dans les flots; dans les deux cas, les portions non calcaires sont abandonnées, non pas sur place, mais dans un lieu assez rapproché : descendues peu à peu à Mortagne sur un certain nombre de mètres, entraînées horizontalement à Dieppe, un peu plus loin; dans les deux cas enfin, ce résidu, qui consiste en débris siliceux et quartzeux, est groupé de façon à constituer des assises nouvelles dont l'âge n'est évidemment point celui de la craie, mais bien celui de leur isolement. Il faut vraiment se refuser à toute philosophie de la science pour méconnaître cette intime analogie.

Quoi qu'il en soit, au-dessous des sables à *Ostrea*, on en trouve d'autres de 3 à 4 mètres de puissance, jaunes ou rougeâtres, et qui m'ont procuré quelques tests beaucoup plus rares que les précédents d'*Inoceramus problematicus* silicifiés et parfaitement reconnaissables. On répéterait à leur égard tout ce qui a été dit tout à l'heure pour les formations superposées, et ces sables viennent, en conséquence, confirmer à leur tour la doctrine de la sédimentation souterraine et la renforcer, en augmentant de toute leur épaisseur la puissance des assises qui lui sont dues.

En présence de semblables faits, dont les conséquences seront facilement mises en valeur tout à l'heure, il a semblé indiqué d'apporter à la théorie le contrôle et l'appui de la méthode expérimentale, et les essais auxquels je me suis livré à ce sujet, dans mon laboratoire du Muséum, m'ont fourni des résultats parmi lesquels je citerai quelques exemples.

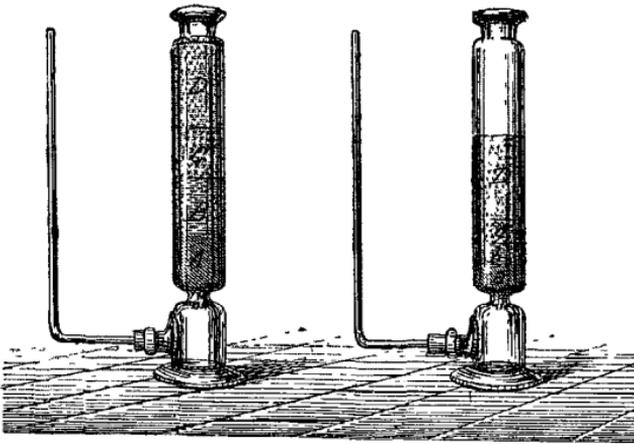


FIG. 28 — Reproduction expérimentale des phénomènes de la sédimentation souterraine. A gauche, éprouvette disposée pour l'expérience et contenant des lits superposés A, B, C, de poussières formées d'une petite portion de grains insolubles et d'un grand excès de carbonate de chaux précipité D, recouvrement de sable inerte A droite, résultat de l'expérience l'attaque des poussières à l'aide d'eau faiblement acidulée arrivant au travers de la couche inerte D, en a réduit les couches aux mêmes lits a, b, c, de résidus insolubles, isolés successivement de haut en bas.

Le vase adopté dans une série d'essais a été l'éprouvette à pied, dite aussi éprouvette à dessécher, (fig. 28) et qui permet le renouvellement facile des substances réagissantes : j'en ai obturé l'étranglement inférieur avec un tampon peu pressé et très perméable d'amiante à longues fibres qui fait un filtre parfait, retenant toutes les particules solides et ne laissant passer que les liquides. Sur ce tampon j'ai placé plusieurs centimètres d'une poussière obtenue en mélangeant des poids égaux de carbonate de chaux précipité et de fer oxydulé naturel passé au tamis très fin. Cette

poussière, d'un gris très clair, est destinée à représenter une couche de calcaire capable de laisser un résidu, facilement visible à cause de sa couleur noire, par le fait de sa dissolution. Il faut prendre de grandes précautions pour disposer cette poudre dans l'éprouvette : si on la met sèche, on constate que l'addition d'eau nécessaire à l'humecter produit de graves désordres en provoquant l'expulsion de l'air interposé. D'un autre côté, si on la délaye avant de l'introduire, les deux éléments, pourvus de densités extrêmement inégales, tendent à se séparer l'un de l'autre. On s'en tire avec beaucoup de patience : avec un tube de papier roulé, on dispose d'abord sur l'amiante une couche très mince du mélange qu'on humecte avec quelques gouttes d'eau apportées avec une très fine pipette dans l'axe du vase. Les petits déplacements locaux ne dérangent point le pourtour, et c'est le fait essentiel. Une deuxième couche sur la première, puis une troisième et, ainsi de suite, en allant très progressivement, on arrive à faire une colonne de 3 ou 4 centimètres de mélange dont on a soin de faire la surface supérieure absolument régulière.

Cela fait, on dispose par-dessus une colonne semblable de carbonate de chaux mélangée de grains de quartz de grosseur convenable, puis on peut remettre une nouvelle épaisseur du mélange n° 1 à fer oxydulé. On achève de remplir l'éprouvette avec du sable quartzueux pas trop fin, destiné à maintenir par son poids les substances sous-jacentes.

C'est alors qu'on remplace peu à peu le liquide, qui filtre très lentement, au travers de toute la colonne, par de l'eau aiguisée d'une très faible quantité d'acide chlorhydrique ou de tout autre acide : dans plusieurs cas, j'ai fait usage d'eau de seltz, mais on rencontre alors des difficultés spéciales à cause des incrustations calcaires qui tendent à se faire dans les régions inférieures. Dès que le liquide acidulé, qui s'est également réparti dans le sable inerte de

la surface, arrive au contact du mélange calcifère, il détermine la production d'un très fin filet noir de fer oxydulé débarrassé du carbonate de chaux qui le dissimulait. Ce filet, qui n'est qu'une très faible fraction de l'épaisseur du mélange primitif, grossit peu à peu, et en même temps le sable superposé s'affaisse tout doucement et dégage d'autant le goulot de l'éprouvette.

Si l'on continue d'arroser le sable de temps en temps avec de l'eau acidulée et alternativement avec de l'eau seule pour faire écouler le chlorure de calcium qui tend à rester dans le sable, alors on voit le petit lit noir qui s'épaissit progressivement, mais de la façon la plus régulière, en restant horizontal et d'épaisseur égale et en provoquant le tassement lent du sable superposé qui le maintient.

Bientôt toute la couche de mélange est privée ainsi de la totalité de son carbonate de chaux et réduite à un niveau entièrement noir qui n'a que le sixième ou le huitième de l'épaisseur primitive de la substance dont il est extrait. Malgré la résistance pour ainsi dire instinctive qu'on a à reconnaître à un semblable lit le caractère de formation stratifiée, il est indiscutable qu'il ne se distingue, par aucun trait essentiel de sa production, des sédiments proprement dits. On voit avec quelle perfection il reproduit les caractères des couches mentionnées tout à l'heure dans le sous-sol de Mortagne et comment, par conséquent, il en éclaire l'histoire d'une manière décisive. Ce lit noir ne peut pas être confondu avec la couche gris clair d'où il dérive : il est de formation très postérieure. La couche grise était antérieure (ou géologiquement plus ancienne) à la masse des sables dont on l'avait recouverte dans l'éprouvette, et, au moment de ce recouvrement, le lit noir que nous venons de produire n'existait pas ; il est donc plus récent que ce qui est au-dessus de lui et l'on se tromperait si, voulant recomposer l'histoire du remplissage de l'éprouvette, on pensait qu'il a été déposé dans ce vase avant le

sable supérieur ; tout ceci est à avoir bien présent à l'esprit quand on se trouve en face des coupes naturelles, et les répétitions dans un semblable sujet ne sont aucunement inutiles.

Une fois ce lit noir bien constitué comme il vient d'être dit, il reste loisible de continuer l'expérience, c'est-à-dire de verser de nouveau de l'eau aiguisée d'acide. On constate alors l'attaque par en haut du mélange de carbonate de chaux et de grains quartzeux et l'isolement progressif de ceux-ci sous forme d'un lit très régulier qui tranche également par son apparence avec la masse blanche sur laquelle il repose et avec le lit noir qui le recouvre. Rien n'est plus facile que d'épaissir peu à peu ce lit jusqu'à la décalcification complète de la couche dont il est le résidu insoluble, et, comme il est bien plus mince qu'elle, sa production s'accompagne d'un tassement général de toutes les substances superposées. Ce tassement, d'ailleurs, se fait si lentement et si régulièrement (si insensiblement on pourrait dire) que le parallélisme des lits n'est aucunement altéré et qu'on ne s'imaginerait jamais que l'ordre de production de ceux-ci est l'inverse exact de l'ordre de superposition. Cependant, le tassement dont il s'agit a dégagé le haut de l'éprouvette de près de 10 centimètres qui restent vides et nous donnent une miniature de l'abaissement possible de la surface du sol comme contre-coup de la dénudation souterraine.

L'expérience continuant, l'isolement complet du lit de sable quartzeux est suivi de l'attaque du mélange inférieur de calcaire et de fer oxydulé, et, par conséquent, de l'apparition d'un nouveau lit noir aussi visible que le premier. Dès lors, on voit que le même mécanisme pourrait être mis en œuvre indéfiniment et que des strates de plus en plus récentes pourraient s'isoler les unes à la suite des autres, sous un système déjà formé. On provoque d'ailleurs avec facilité des inégalités dans l'attaque aux divers points et il en résulte des *poches* analogues à celles que

remplissent si souvent le phosphate de chaux, ou l'argile à silex (fig. 29).

En continuant mes études dans cette voie qui paraît très féconde, je suis arrivé à reconnaître que beaucoup de niveaux caractérisés avant tout par l'abondance de la silice hydratée, doivent se rattacher à la même genèse générale et j'ai signalé comme exemple spécialement net dans ce sens, la formation de l'opale farineuse des environs de

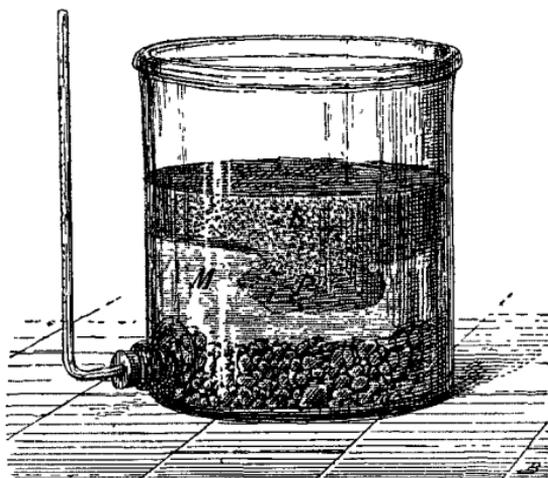


FIG 29 — Mutation expérimentale des poches souterraines remplies de phosphate de chaux ou d'autres substances S, sable quartzeux, M, mélange de carbonate de chaux précipitée et de grains de phosphate de chaux reposant sur un lit de gravier, P, poche produite par l'arrosage du sable à l'aide d'eau faiblement acidulée.

Vierzon, qui se range ainsi, comme certaines gaizes et malgré ses caractères propres de composition chimique, dans la même catégorie de productions que l'argile à silex.

Cette conclusion a provoqué des protestations : d'abord on s'est attaché à l'expression que je viens de reproduire et on a été jusqu'à invoquer le témoignage qui semble bien superflu, de personnalités scientifiques pour constater que de la silice gélatineuse n'est pas une argile.

On a noté ensuite comme décisif, ce fait que la « Vierzonite » comme on veut appeler la silice pulvérulente est

parfois recouverte d'une formation calcaire, ce qui, dit-on, en empêcherait l'origine par décalcification.

Enfin, on a fait valoir avec une allure triomphante, que la silice gélatineuse est soluble dans les acides et que par conséquent, elle ne saurait subsister parmi les éléments d'un résidu de dissolution,

Tout cela paraît très évident et cependant rien de tout cela ne résiste à l'examen. Et c'est précisément en étudiant les objections qu'on m'a faites (sorte d'étude que j'aime beaucoup et que je n'ai jamais poursuivie sans de grands avantages) que je suis arrivé à confirmer mes premières conclusions et à leur donner une force toute nouvelle.

D'abord, en laissant de côté le premier point déjà visé, le fait du recouvrement par du calcaire d'un produit de décalcification est extrêmement fréquent et il se borne à nous procurer une donnée précieuse quant à l'âge du phénomène de la dissolution. Dans l'espèce on doit reconnaître qu'une roche de composition convenable et que nous allons préciser, a été soumise au régime continental avant son affaissement sous les eaux du lac dans lequel se sont stratifiés ensuite les calcaires et les marnes qu'on nous oppose. C'est la répétition pour l'époque tertiaire, du fait maintes fois répété, pendant les temps crétacé et jurassique et d'où sont résultés des gaizes, des bone-beds et des roches analogues.

D'un autre côté, la solubilité de la silice gélatineuse ne signifie aucunement ce qu'on veut lui faire dire et je puis invoquer le témoignage direct d'expériences variées. Par exemple, je place dans l'appareil à sédimentation souterraine, et qui n'est autre qu'une éprouvette à dessécher, une certaine épaisseur de carbonate de chaux précipité gâché dans une dissolution étendue de silicate de soude. En faisant intervenir ensuite de l'acide chlorhydrique très étendu, au travers d'une couche de sable superposée, on voit s'isoler lentement à la partie

supérieure de la colonne calcaire un lit de silice gélatineuse qui va constamment en augmentant et ne songe point à se dissoudre.

L'expérience prend même une signification plus nette si on la recommence non plus sur un mélange artificiel de substances préalablement choisies, mais avec une roche naturelle. Elle est devenue spécialement intéressante avec certaines variétés du calcaire de Saint-Ouen qui renferment des concrétions de silice hydratée (opale ménilite) et où l'analyse chimique a révélé la présence de 2 350 pour 100 de silice gélatineuse facilement extractible par une lessive alcaline. J'ai fait usage pour ces recherches d'échantillons très aimablement recueillis pour moi dans les travaux du métropolitain à l'avenue de Villiers par M. A. Dollot, correspondant du Muséum, que je me fais un plaisir de remercier.

Après quelque temps de séjour dans l'éprouvette, la colonne de calcaire de Saint-Ouen s'est recouverte d'un petit lit parfaitement régulier d'une substance ayant une composition tout à fait analogue à celle de la « vierzonite » et renfermant même 88,624 pour 100 de silice gélatineuse, le reste étant formé d'argile avec une très faible proportion de sable.

L'aspect de la matière rappelle à tel point celui des argiles magnésiennes à ménilites de Ménilmontant (sépiolite) qu'on peut légitimement se demander si celles-ci ne constituent pas un produit de sédimentation souterraine réalisé aux dépens de couches calcaires ayant eu une composition analogue à celles des roches de l'avenue de Villiers.

Dans ce cas, il y aurait lieu d'éliminer, au grand bénéfice de la philosophie géologique, l'intervention si gratuitement supposée de causes différentes de celles que nous surprenons à l'œuvre de toutes parts. La production d'un sédiment siliceux n'est pas facile à comprendre en dehors de conditions très spéciales, tandis que nous voyons à

chaque instant la silice s'arrêter dans les masses calcaires de façon à y constituer des réserves très aptes à se concentrer ultérieurement par voie de décalcification.

Il suffit que le calcaire attaqué ait été absolument privé de fer pour que la « *vierzonite* » résultante jouisse de cette blancheur qui paraît étonner certaines personnes : c'est la répétition du fait présenté par les argiles à silex de Prépotin (Orne) et qui sont si pures qu'elles cuisent en blanc à la façon des meilleures terres de pipe.

Les applications de ce genre de phénomènes sont sans nombre ; parmi ceux de constatation très facile, on peut noter, entre Auvers et Valmondois (Oise), l'extension sur l'argile plastique de sables verts tout pareils à ceux qui résistent à la dissolution du calcaire grossier inférieur. Dans une large partie du Vexin, on voit la même argile recouverte d'une couche mince de petits nodules siliceux noirs, remarquables à la fois par l'uniformité de leur forme ellipsoïdale. C'est avec intérêt qu'on retrouve exactement les mêmes nodules comme éléments du calcaire grossier inférieur à Issou, auprès de Mantes, dont les couches soumises à la dénudation pluviale reproduiraient exactement la disposition constatée autour de Chaumont.

L'histoire de bien des minéraux silicifiés se rattache aux mêmes phénomènes.

Par exemple, il y a bien longtemps qu'on sait l'existence des lits de silex subordonnés aux assises du calcaire grossier supérieur, et Cuvier et Brongniart la mentionnent déjà dans la *Description géologique des Environs de Paris* (p. 284 et suiv.). Toutefois il ne paraît pas que les concrétions dont il s'agit aient été jusqu'à présent l'objet d'un examen spécial et c'est ce qui me décide à résumer en quelques lignes les observations auxquelles j'ai eu récemment l'occasion de les soumettre. Les matériaux de mes études proviennent d'un puits qui a été percé dans ces derniers temps au lieu dit la Côte aux Buis dans le parc de l'École nationale d'agriculture de Grignon et qui

a traversé successivement les caillasses coquillières (banc franc) à *Lucina saxorum*, le banc vert à *Cyclostoma mumia* et une partie du banc royal à *Orbitolites complanata*. Les silex ne sont pas très strictement localisés dans une couche spéciale; il se trouvent dans plusieurs lits au contact mutuel du banc vert et des caillasses coquillières: j'ai des spécimens parfaitement silicifiés de *Lucina saxorum*, *L. Menardi*, *Pinna margaritacea*, *Cerithium angulosum* et autres *Cerithium* et *Turritella*, etc. La forme des silex est très variable, et souvent très tuberculeuse; ce sont des rognons rappelant tout à fait pour les contours les pierres à fusil de la craie de Meudon. Parfois ils se soudent et constituent des masses plus ou moins volumineuses qui arrivent à faire des lits presque complets, stratifiés comme les couches calcaires voisines. Dans tous les cas les parties externes de ces concrétions sont terreuses et d'un blanc grisâtre, et c'est surtout la cassure qui fait reconnaître sans essais, la matière siliceuse de la roche.

La partie interne est très variable d'un cas à l'autre, et ce n'est pas toujours qu'on y rencontre une substance bien compacte d'une nuance foncée, à cassure un peu conchoïde et rendant sous le choc du marteau le son ordinaire du silex.

Bien souvent l'aspect terreux et poreux de l'extérieur se continue jusqu'au cœur et les nodules se présentent manifestement comme des résultats d'épuisement de rognons qui devaient avoir antérieurement un caractère tout autre. Enfin, un type intermédiaire entre les deux extrêmes est fourni par des spécimens qui sont pour ainsi dire mouchetés, présentant, sur un fond blanchâtre de matière plus ou moins épuisée, des îlots plus foncés à coutumes capricieuses et offrant la texture relativement compacte indiquée pour le premier type.

Ce qui fait avant tout l'intérêt de ces diverses variétés de concrétions siliceuses, c'est que le microscope y révèle une constitution qui témoigne très éloquemment de l'ac-

tivité avec laquelle s'accomplissent des phénomènes secondaires dans des couches déjà constituées.

Les lames minces taillées dans les types foncé et compact y montrent (fig. 30) une accumulation tout à fait remarquable de fossiles parmi lesquels se signalent par leur abondance des diatomées souvent bien reconnaissables : ce sont surtout des *Gallionella* et des *Fragilia*, auxquels s'ajoutent des *Synedra*, des *Navicula*, et quelques *Triceratium* ; ce sont aussi des formaminifères et avant tout des



FIG 30 — Lame mince de tuffeau siliceux de Gignon vue au microscope (80 diamètres)

millioles (*Quinqueloculina*), des *Valvulina*, des *Textularia* et des *Globigerina*.

Dans les variétés qualifiées plus haut de *mouchetées*, la grande place est laissée à des spicules de spongiaires parmi lesquels paraissent prédominer de beaucoup des spicules monoaxes généralement rectilignes et quelquefois courbés ; on voit en outre quelques spicules de tétrachinellidés. Dans les points riches ainsi en spongiaires, les diatomées sont relativement rares ; on y reconnaît des *Fragilia* et des formes qui rappellent les *Eunotia* et les *Surirella*.

Enfin dans les échantillons entièrement terreux et d'ap-

parence épuisée, les vestiges fossiles sont beaucoup plus indistincts et parfois difficiles à reconnaître ; mais on sait qu'ils ont été attaqués et qu'originaires ils devaient être aussi nombreux que dans les types précédents.

En présence de cette description sommaire on ne peut qu'être très frappé de la ressemblance intime des concrétions qui nous occupent avec des roches éocènes du Nord de la France et de la Belgique où elles sont qualifiées de *tuffeaux* et qui cependant sont toutes géologiquement plus anciennes puisqu'elles sont, soit du niveau des sables de Bracheux (glauconie inférieure) comme les tuffeaux de La Fère ou d'Angers, soit du niveau des sables de Cuise (glauconie moyenne) comme ceux du Mont des Cats.

Le « tuffeau » de Grignon présente avec ces roches une autre différence qui peut être significative quant à l'origine de cette catégorie de formations, car il est subordonné non à des sables mais bien au contraire à des couches entièrement calcaires.

Il n'y a pas doute qu'il ne nous présente un exemple de roche qui, depuis l'époque de son dépôt, a traversé des vicissitudes nombreuses.

A son début, c'était une vase surtout calcaire accumulée sur le fond d'une mer où vivaient ensemble pour y mêler leurs dépouilles après leur mort, outre un certain nombre de mollusques, des myriades d'éponges, de diatomées et de foraminifères. Les lits ainsi constitués et qui ont mis longtemps à se former ont été recouverts de plusieurs mètres de formations également marines.

Beaucoup plus tard, le soulèvement du sol a rendu la région continentale et c'est alors que les transformations chimiques ont dû prendre le plus d'importance dans l'épaisseur des couches considérées. Toutefois, même avant cet événement, des changements profonds s'y sont déclarés et poursuivis, et c'est même une occasion de protester contre une opinion qui a été émise à propos des tuffeaux siliceux du Nord, que la silification qu'on y

observe doit témoigner d'un régime continental et supposer la collaboration de masses silicifères interposées. L'observation de tous les jours conduit à reconnaître au contraire qu'une couche donnée peut être le théâtre de concrétions siliceuses, par le seul fait de la circulation des eaux souterraines au travers de sa masse. L'histoire des rognons de silex de la craie, sous plus de cent mètres de revêtement calcaire, ne s'expliquerait pas si elle exigeait le concours nécessaire des eaux carboniquées météoriques. C'est que la silice, bien plus malléable à cet égard que le carbonate de chaux, se dissout fort bien dans l'eau exempte de toute trace d'acide carbonique. Aussi pouvons-nous attribuer la constitution du tuffeau siliceux de la Côte aux Buis (et la conclusion s'étendra sans doute aux formations analogues) à une dissolution souterraine de la silice hydratée des tests animaux et végétaux et à son transport autour de certains centres d'attraction qui en ont déterminé la précipitation et la déshydratation partielle.

Mais l'influence continentale n'est pas moins évidente comme un détail de l'histoire de cette roche auquel se rattache la dissection qu'elle a subie en tant de points et qui lui a donné l'apparence épuisée et la porosité nectique que nous avons signalées. Quant à dire à quelle époque il faut rattacher cet épisode dans les transformations, c'est ce qui ne paraît pas facile, car les oscillations verticales du sol ont été évidemment très nombreuses dans le pays. L'intégrité des couches superposées à *Corbula anatina* doit cependant faire reporter le phénomène à un moment de l'époque éocène correspondant peut-être à l'extension des lacs où vivait en abondance le *Cyclostoma mumia*.

Il convient d'ajouter que souvent le travail d'ablation réalisé à la surface par l'eau météorique peut être non plus chimique, mais entièrement mécanique, et consister dans l'entraînement de particules sableuses et limoneuses interposées entre des pierrailles ou des nodules moins déplaçables.

C'est ainsi que dans tant de points, aux Hautes-Bruyères, entre autres, nos sables tertiaires supérieurs sont couronnés d'un cordon plus ou moins discontinu de petites meulières arrondies et corrodées, seuls témoins actuels de l'épaisse formation dont elles faisaient partie et qui, peu à peu, s'est désagrégée. C'est ainsi encore, que des chaos de blocs en désordre se sont constitués, dans la forêt de Fontainebleau, près d'Étampes, près de Nemours, etc., par le déchaussement progressif des nodules de grès primitivement ensevelis dans la masse sableuse.

La dénudation souterraine peut sans doute se réaliser aux dépens de certaines couches recouvertes d'assises imperméables et qui ne manifestent pas les traces du passage des eaux. Il suffit pour cela que ces couches, grâce à leurs inflexions, viennent affleurer par leurs bords, de façon à admettre des suintements qui puissent y circuler. La disposition classique des lits sableux, réceptacles des nappes souterraines, convient absolument à cet égard, et le sable vert albien des régions souterraines de Paris, où s'alimentent les sondages de Grenelle et de Passy, peut être regardé comme un résidu de lavage accompli dans des conditions spéciales. Depuis longtemps, les eaux artésiennes se sont montrées capables d'extraire des profondeurs, non seulement des substances dissoutes, mais des quantités de grains insolubles, qui peuvent s'accumuler au dehors. Il est clair que des tassements, à allures plus ou moins analogues à celles des tremblements de terre, doivent de temps en temps racheter de semblables pertes de substance.

Certaines couches de sable, au lieu de représenter comme bien d'autres des dépôts originairement sableux, sont également des résidus du lessivage souterrain, éprouvé par des formations tout d'abord beaucoup plus complexes, et nous avons des faits indiscutables qui le prouvent.

C'est à ce titre qu'il convient de citer ici les grès exploités encore au lieu dit le bois de Romainville, et qui constituent la base du sable de Fontainebleau, renfermant à l'état de moules externes et internes toute la faune de Jeurre : *Natica crassina*, *Cerithium plicatum* et *trochleare*, *Cytheræa splendida* et *incrassata*, *Lucina Heberti*, etc., y pullulent. Il est manifeste que la couche sableuse fossilifère, ayant été cimentée par de la silice et transformée en grès, la décalcification ne s'est exercée sur elle qu'après l'acquisition de sa solidité. La dissolution des coquilles y a produit des vides dont les formes sont si rigoureusement celles des tests empâtés, qu'un surmoulage à la cire permet les plus exactes déterminations zoologiques. Or, supposons que la cimentation en grès n'ait pas eu lieu, les choses se seraient passées de même, à cela près qu'aucun indice n'eût persisté de l'ancienne existence des coquilles dissoutes. Et cette remarque autorise l'opinion, justifiée en bien des cas, que des sables maintenant azoïques, ont été simplement privés par dissolution des fossiles qui d'abord y avaient été enfouis.

Bien entendu, ces remarques, pour indiscutables qu'elles soient, ne doivent pas nous pousser, par une exagération évidente, à déclarer que tous les sables azoïques ou que toutes les couches composées de matières insolubles, sont des résidus de dissolution souterraine. Il y a, à cet égard, à user de discernement et à faire intervenir la condition générale des masses voisines et les traces des phénomènes qui se sont exercés sur elles.

On voit combien il est contraire à l'observation d'admettre, comme on le fait pourtant quelquefois, que la décalcification soit forcément contemporaine du dépôt. Elle peut au contraire et doit même ordinairement être très postérieure ; c'est un point qui sera même démontré plus loin, et l'on verra que les particules concentrées par le lavage sont fréquemment des résultats de réactions lentes et très postérieures elles-mêmes au dépôt des couches.

Parmi les applications les plus larges de la notion maintenant acquise de la sédimentation souterraine, il en est une qui ne peut manquer de séduire les esprits philosophiques par son caractère de généralité. C'est celle qu'on peut en faire à la détermination du régime continental auquel, à des époques quelconques, certaines couches du sol ont pu être soumises.

Tout d'abord, on peut rappeler la difficulté qui se présente d'habitude quand on se propose de déterminer le facies continental de formations un peu anciennes. Elle est si grande, qu'elle a conduit l'un de nos géologues les plus illustres, Constant Prévost, à contester que des couches, après avoir été exondées un temps plus ou moins long, aient pu redevenir des fonds de mer aptes à recevoir des sédimentations nouvelles. Dans son étude sur les *Submersions itératives des continents actuels*¹, il insiste sur les caractères de la surface du sol soumis à l'activité subaérienne, et il constate qu'on ne retrouve rien qui les rappelle dans l'épaisseur de l'édifice stratifié.

Mais on doit remarquer ici que l'invasion par la mer d'une région continentale doit, le plus souvent, s'accompagner d'un *écroulement* superficiel dont l'effet le plus immédiat est de faire disparaître les traits morphologiques dont il s'agit. Il y a un arasement ordinaire et souvent même une destruction intéressant quelques mètres et qui auraient dû faire réfléchir. Le phénomène est même si intense en bien des points, qu'il doit nécessairement faire disparaître toute trace du régime continental, et c'est, par exemple, ce qui a nécessairement lieu dans les régions où les progrès de la mer se font comme en haute Normandie, en Picardie, dans le Boulonnais et ailleurs, au prix de la destruction de falaises d'une hauteur considérable. Il est clair que, dans le bassin redevenu marin, les sédiments actuels

1. Le vrai titre de ce travail est : *Les continents actuels ont-ils été à plusieurs reprises submergés par la mer ?* Il a été lu à l'Académie des sciences dans ses séances des 18 juin et 2 juillet 1827.

se déposent sur des roches fraîchement décapées et qu'entre les unes et les autres il n'y a aucune place pour le moindre vestige du régime continental intermédiaire.

Mais, en écartant ces circonstances et en nous en tenant au cas très fréquent où la mer a dû envahir des terres basses ou peu élevées, nous voyons par les faits qui constituent le sujet même du présent chapitre que plusieurs mètres en profondeur (10, 15, 20 mètres et plus) ont pu subir, du voisinage de la surface exondée, des contre-coups qui leur ont imprimé des traits tout à fait particuliers. Si l'on retrouve ceux-ci, comme dans le Berry, on sera autorisé à y voir des preuves que le régime continental s'est exercé dans le pays à un moment plus ou moins facile à préciser, mais qui, dans certains cas, pourra être déterminé au moins dans certaines limites.

Supposons, par exemple, que, comme la chose a lieu dans plus d'une région, les lits de *bone beds* du terrain infraliasique soient surmontés de sables ou de grès par-dessus lesquels se développe une série marine, telle que celle du sinémurien, nous serons autorisés à penser qu'entre l'époque où se sont accumulés les débris qui font la richesse de la « couche à ossements » et celle où la mer nourrissait dans le même point les gryphées arquées, le sol avait subi un exhaussement qui l'avait porté au-dessus des flots et qu'il s'était trouvé soumis pendant un laps de temps plus ou moins long à l'action des eaux météoriques : en d'autres termes, qu'antérieurement à l'invasion de la mer sinémurienne la région avait été continentale. En remettant à plus tard de développer ce point qui mérite des détails précis, ceci suffit pour faire pressentir la collaboration des considérations nouvelles à la paléogéographie, jusqu'ici si aléatoire.

Il convient, d'ailleurs, de remarquer qu'en certaines circonstances il ne faudrait pas repousser les conclusions que je viens de formuler, par ce seul fait que des couches qui doivent être regardées comme devant leur gisement à

des phénomènes profonds de décalcification seraient cependant pourvues d'une quantité plus ou moins notable de calcaire. Il s'en faut, en effet, de beaucoup que la sédimentation souterraine soit toujours exclusivement mécanique. Souvent elle admet des éléments d'origine chimique, et nous en avons des exemples à Mortagne même, soit par des grès dits *grignards* qui ont été cimentés sur place par l'oxyde de fer, soit par les concrétions siliceuses, orbicules et autres, qui jouent un si grand rôle dans la production de certains sables. Il est évident que, de la même façon, du calcaire peut être apporté par les eaux dans des couches qui, précédemment et à la faveur de conditions différentes, ont subi une décalcification plus ou moins complète. Il nous serait facile d'en citer au besoin des exemples évidents.

Quoi qu'il en soit, ce qui précède suffit, je crois, pour justifier, parmi les processus variés d'où peuvent dériver les couches constitutives du sol, l'admission de la *sédimentation souterraine* et pour prévoir que sa considération, jusqu'ici à peu près méconnue, ouvrira des horizons nouveaux à la géologie générale. C'est le but que je m'étais proposé d'atteindre.

La formation de la gaise oxfordienne des Ardennes paraît devoir se rattacher à un moment où la région étant exondée les eaux de pluie en ont disséqué la partie supérieure. Les éléments siliceux qui y étaient en mélange et avant tout les spicules d'éponges ont été dissous et la silice a ainsi pénétré dans les régions plus profondes qu'elle a silicifiées.

M. Cayeux ¹ qui expose cette idée pense que le phénomène a dû se faire immédiatement après le dépôt de la gaise et que la récence donnait aux spicules une plus grande solubilité. Mais les faits présentés par les couches

¹ *Contribution à l'étude microscopique des terrains sédimentaires*, p 76 (1897).

de Prépotin montrent que la mise en mouvement de la silice peut s'accomplir sous l'influence des eaux de pluie bien plus tard qu'on ne l'aurait cru d'abord.

Les tuffeaux éocènes de la Belgique et du Nord de la France, ainsi que les sables auxquels ils sont associés se présentent comme étant des produits bien évidents de la sédimentation souterraine par décalcification des couches antérieures beaucoup plus épaisses. Ce qui suffit à le montrer et ce sur quoi les auteurs n'ont pas insisté, c'est la présence dans leur masse de coquilles de mollusques silicifiées. Il est clair que celles-ci représentent ce qui a résisté parmi les vestiges fossiles, comme les grains de sable représentent ce qui a résisté parmi les éléments inorganiques.

L'examen de ces roches conduit à reconnaître une bien plus grande importance aux phénomènes de la sédimentation souterraine.

Le tuffeau éocène de Linceul (Belgique) (Cayeux, p. 134) montre une étape intéressante des phénomènes souterrains. On y voit une roche encore fortement calcaire et qui déjà est en voie de silicification intense; c'est un degré bien plus avancé que celui représenté par le calcaire grossier à fossiles silicifiés et à rognons de silex, mais c'est un terrain bien moins avancé que celui qui est représenté par la meule de Bracquegnies.

La meule de Bracquegnies, en Belgique, si bien étudiée par Briart et Cornet¹ est un type remarquable de terrain silicifié. Subordonnée au niveau du *Schloembachia inflata*, la meule consiste en un grès fossilifère dont le ciment est constitué par de la silice gélatineuse ou par de la calcédoine et dont les fossiles sont transformés en silice avec leurs cavités remplies parfois de géodes de quartz cristallin.

Toutefois Cornet et Briart attribuent à la silice qui imprègne cette roche une origine hydrothermale.

1 *Mémoires couronnés par l'Académie royale de Belgique*, t. XXXIV, 1868.

Suivant moi, la meule de Bracquagnies est tout entière un résultat de décalcification et de sédimentation souterraine : elle est réduite à du sable cimenté en grès et en débris organiques siliceux originaires comme les spicules, ou silicifiés comme les coquilles de mollusques.

C'est une formation à rapprocher de celles de Prépotin et qui en diffère surtout parce que les grains quartzeux y ont été cimentés ensemble par un excès de silice.

Dans le tuffeau de Morlanwelz, le test des nummulites est toujours silicifié. C'est la preuve que la sédimentation de ces masses a été précédée d'une décalcification générale : il y a donc à signaler ici un cas bien net de sédimentation souterraine.

M. Cayeux ne le comprend pas bien quand il dit que c'est un calcaire glauconieux silicifié : c'est un résidu du calcaire où la silicification avait pris naissance et qui a perdu une portion plus ou moins grande de son épaisseur.

La production des meulières des environs de Paris correspond sans aucun doute à une époque de régime continental dont la date est sans doute fort rapprochée des temps actuels, mais qu'il est difficile de préciser. Il est vraisemblable que la silicification des couches du travertin de Brie sont synchroniques de celles des couches du travertin de Beauce qui auraient perdu en même temps le manteau de roches, enlevées par l'intempérisme et dont la dissolution partielle a pu alimenter en silice les eaux d'infiltration.

Après cet examen rapide des phénomènes produits par la nappe superficielle dans ses portions dissimulées au sein de la pellicule perméable qui constitue le sol, il est tout à fait indispensable de constater qu'elle a réalisé des effets particuliers dans les points où elle s'est constituée en filet coulant à l'air libre sous la forme fluviale.

Il résulte, en effet, de l'examen qu'on en peut faire, des notions qui s'appliquent directement au problème, si long-

temps agité et si diversement résolu par les auteurs, du creusement des vallées.

S'il n'y pleuvait jamais, la vallée de la Sorgue satisfait aux conditions qu'on a données comme générales pour le creusement des vallées : là on pourrait chercher les progrès de ces régularisations du cours initial passant peu à peu à l'état de régime d'équilibre. Mais dans les vallées ordinaires comme celle de la Seine il y a dans chaque point une influence prépondérante de la forme des versants, de l'abondance et de la rapidité d'arrivée de l'eau qu'ils fournissent, et la forme du thalweg d'ailleurs déplacé à chaque instant doit se composer avec celle des profils transversaux.

Si l'on admet la justesse des observations présentées dans la première partie, on arrive logiquement, et sans hésitation possible, à la conception du phénomène de la sculpture générale de la surface du sol dont le creusement des vallées n'est que le détail le plus visible. Et l'on ne peut qu'être frappé du contraste profond qui existe entre la simplicité réelle de ce chapitre et les opinions compliquées auxquelles on s'est arrêté d'abord à son égard ; — nous avons d'autant plus le droit de nous arrêter un instant à ce point d'histoire qu'il y a encore beaucoup de géologues qui conservent une partie des anciennes manières de voir.

Ce qui domine parmi celles-ci c'est la préoccupation de faire du phénomène un événement instantané : ainsi Dolomieu considérant le diluvium, dont le nom avait été introduit dans la science en 1819 par William Buckland, le qualifie de *manteau de la terre*, ce qui est bien trouvé, mais émet l'opinion qu'il s'est produit au même moment dans tous les points où il s'étend. On sait d'ailleurs que cette opinion procède, inconsciemment, d'ailleurs, de l'enseignement traditionnel et que tout d'abord on n'hésita pas à voir dans les lambeaux de diluvium et dans les déléments de la surface du sol, des traces du déluge

mosaïque. Dès 1690 Burnet et en 1692, Ray, puis Woodward en 1695, Whiston l'année suivante et Hutchinson en 1724 furent en Angleterre les plus brillants défenseurs de l'École diluvianiste. « Une chose à remarquer, dit Woodward¹, est l'universalité du Déluge, proportion sur laquelle j'insiste. Pour cet effet, le Lecteur n'a qu'à considérer ce que j'avance et que j'ai tiré des relations authentiques; savoir que les corps dont nous avons parlé ci-dessus se trouvent dans toutes les parties connues du monde, dans l'Europe, l'Asie, l'Afrique et l'Amérique et même sur le sommet des montagnes les plus élevées. Ainsi je crois qu'il ne saurait douter raisonnablement de ma proposition: mais surtout s'il ajoute ce que je dis du grand abyme; savoir que cet immense réservoir contient encore à présent assez d'eau pour un déluge semblable et pour inonder et couvrir tout ce globe, même les montagnes les plus hautes. »

Chez nous-mêmes les avis furent tout à fait conformes aux précédents. En 1806, André (connu ci-devant sous le nom de Chrysologue) déclare que² « c'est une cause générale qui a creusé les vallées; elle a été essentiellement douée d'une promptitude et d'une violence extraordinaires ».

En 1849, d'Archiac³ était d'avis que « l'évasement des vallées, si différent de la forme présentée par les sillons des torrents, est l'effet d'une cause différente de celles qui s'exercent aujourd'hui ».

Belgrand, pour borner ces citations, écrivait en 1869⁴: « Le relief actuel du bassin de la Seine se comprend très bien si l'on suppose que l'emplacement de ce bassin a été balayé par une grande masse d'eau qui s'est déversée par-dessus la chaîne de la Côte-d'Or. »

1. *Géographie physique*, traduction de Noguès. Paris, 1735, p. vi.

2. *Théorie de la surface actuelle de la Terre*, p. 280.

3. *Histoire des progrès de la Géologie*, t. II, p. 167.

4. *La Seine aux âges antéhistoriques*, p. 7.

C'est en conséquence de ces points de vue que la plupart des géologues sont unanimes encore aujourd'hui pour proclamer que le creusement des vallées est l'œuvre de courants aqueux beaucoup plus larges, beaucoup plus profonds et beaucoup plus rapides que les fleuves actuels.

En 1843 Elie de Beaumont a consacré une publication spéciale aux preuves de la grande étendue qu'ont embrassée les courants diluviens. Méconnaissant l'activité des courants d'aujourd'hui comme agents de dénudation, il leur attribue toute la profondeur qui sépare leur thalweg actuel des plus hauts points des flancs des vallées où l'en rencontre des matériaux de transport et il en conclut la rapidité de ces courants. Descendant « un des rameaux de l'arbre de Seine » depuis Pont Aubert, par le Cousin, la Cure et l'Yonne il constate que l'alluvion est partout semblable à elle-même et il pose en conséquence cette conclusion que tous les rameaux ont été parcourus en même temps par le courant, en vertu d'une cause générale embrassant tout le bassin.

Passant aux chiffres, Léopold de Buch a estimé à 19460 pieds cubes à la seconde le débit des courants diluviens et il faisait intervenir comme moteur de ces montagnes d'eau le subit soulèvement de la chaîne des Alpes.

Saporta, dans son *Monde des Plantes* (p. 118) publié en 1879, écrivait encore : « Lorsqu'on s'attache à l'ensemble de cette période que les géologues ont nommée *quaternaire*, on est frappé de l'accroissement très sensible de l'humidité sur toute la surface de notre hémisphère et *probablement dans le monde entier* par rapport à l'état hygrométrique actuel. En Europe les fleuves ne sont que des ruisseaux en comparaison de ce qu'ils étaient alors. La plupart, réduits à un mince filet d'eau, se sont creusés un sillon au milieu des déjections de leur ancien lit. Les

berges actuelles montrent sur leurs tranches des lits horizontaux de sable, d'argile et de cailloux roulés ; comme ces lits se correspondent exactement d'un bord à l'autre, il est aisé de rétablir leur extrémité et de reconstituer l'ancien fleuve. On reconnaît souvent alors qu'il remplissait la vallée entière, là où son courant cache maintenant à un niveau inférieur le volume amoindri de ses eaux. »

C'est en somme la réédition de l'opinion magistrale de Cuvier et Brongniart¹ : « Ce n'est pas la Seine actuelle, disent-ils, ni aucun cours d'eau ayant la même origine que cette rivière qui a creusé la vallée dans laquelle elle coule, opinion émise par Deluc et par Dolomieu et qui ne peut manquer d'être adoptée généralement quand la suite des observations le fera mieux comprendre et sera venue la fortifier de nouvelles preuves... » « Ce sol renferme quelquefois de gros blocs de grès et de meulières qui y sont épars et qui, formés ailleurs, y ont été apportés par des forces dont nous ne connaissons plus d'exemples dans nos cantons. »

La structure du diluvium mérite de nous arrêter un moment et il convient, dans la série des types qu'on pourrait examiner, de choisir le diluvium de la Seine. J'en ai fait dans ces derniers temps l'objet d'une étude dont le résultat m'a paru spécialement net et probant, en faveur des grandes doctrines actualiste et activiste.

Jusqu'à présent on est généralement d'accord pour trouver au diluvium une allure torrentielle : « Des zones de cailloux roulés, indices d'inondations violentes, y alternent souvent avec des veines de sable fin où la présence de coquilles fluviales très délicates attestent que momentanément la vitesse de la rivière était assez amortie². » Or, ce n'est pas sans surprise qu'en regardant avec soin le diluvium de la Seine on découvre qu'au lieu d'être une

1. *Description géologique des environs de Paris*, p 562.

2. De Lapparent, *Traité de géologie*, 4^e édition, p 1603, 1900.

collection confuse de matériaux quelconques mélangés sans ordre, c'est au contraire un véritable tissu d'une délicatesse extrême où chaque grain pierreux occupe une situation strictement réglée. Là où l'on s'attendait à trouver cette « disposition torrentielle » si souvent supposée, on admire une histologie véritable.

Tout d'abord et pour préciser, il importe de rappeler qu'on connaît bien la structure des dépôts torrentiels : il est bien facile de l'étudier dans d'innombrables localités de nos montagnes, où les torrents laissent l'été leur lit à peu près desséché et elle est d'autant plus facile à reconnaître que souvent des excavations y sont ouvertes, pour l'extraction des sables propres aux constructions. Ce qui frappe alors à première vue, c'est le mélange de blocs de grosseurs très diverses, parfois énormes, jetés avec un apparent désordre et réunis par des grains beaucoup plus petits et même çà et là par de la boue. En faisant plus d'attention on voit que, même dans le lit du torrent, le triage, c'est-à-dire l'ordre, tend nettement à se manifester : seulement le temps lui a manqué pour devenir complet. Il se reconnaît à la situation des parties les moins grosses par rapport aux autres : on voit que les blocs, quand ils se sont arrêtés, se sont constitués à l'état d'abri pour ce qui était immédiatement au-dessous d'eux dans le courant et en ont ainsi prévenu l'enlèvement. Si l'eau avait continué de couler avec la même allure, mais sans apporter des matériaux nouveaux jetés pêle-mêle dans son lit, elle aurait lavé les gros morceaux de tout ce qui était plus léger et aurait exactement classé les débris. Cette étude conduit à reconnaître, même dans les cas les moins favorables, l'irrésistible tendance de l'eau en mouvement à séparer les diverses catégories de particules minérales au contact desquelles elle se meut.

Ceci une fois admis, si l'on se transporte devant un front de taille d'exploitation convenablement choisi de diluvium de la Seine, voici ce que l'on constate : la masse

du diluvium exploité dans la très grande majorité des grévières des environs de Paris se divise en trois horizons superposés (fig. 31). Le plus profond *a* est formé de blocs et de gros galets dont le volume a presque fatalement inspiré aux premiers observateurs l'idée d'en rattacher le dépôt à l'action d'énergiques agents de transport. Le niveau moyen *b* à *f* est composé de sables, de graviers et de galets à peu près et même parfois tout à fait dépourvus de limon. Et, tandis que cet horizon se signale par l'absence des particules fines, le niveau supérieur, *g* au contraire, offre au regard une proportion plus ou moins considérable de substances argileuses.

Ces trois zones ne sont pas séparées mutuellement d'une manière absolue et l'on voit parfois des passages de l'une à l'autre, mais cela ne retire rien à leur netteté qui les fait distinguer à première vue. On les a souvent attribuées à un adoucissement progressif dans l'allure de cours d'eau qui, à l'origine, auraient été capable de charrier de gros blocs, plus tard seulement des graviers de moyenne grosseur et enfin des sables et des limons. Mais une foule d'observations s'élèvent contre cette conception qui cependant a eu beaucoup de partisans et, parmi ces observations, il faudra faire une place tout à fait à part à celles qui ont pour objet la comparaison des graviers des bas niveaux comme ceux de Créteil avec celle des graviers des hauts niveaux comme ceux de Bicêtre (Kremlin). Bien que ce dernier dépôt soit de constitution certainement beaucoup plus ancienne que les précédents, la structure en est cependant identique avec la leur et l'on ne voit nulle part dans son économie l'intervention d'un agent spécialement énergique. Ce point de vue est d'une éloquence décisive.

Mes études m'ont amené à la conclusion que les différences constatées entre les trois horizons superposés de nos graviers, résultent avant tout des différences présentées au même moment par les divers points d'une vallée

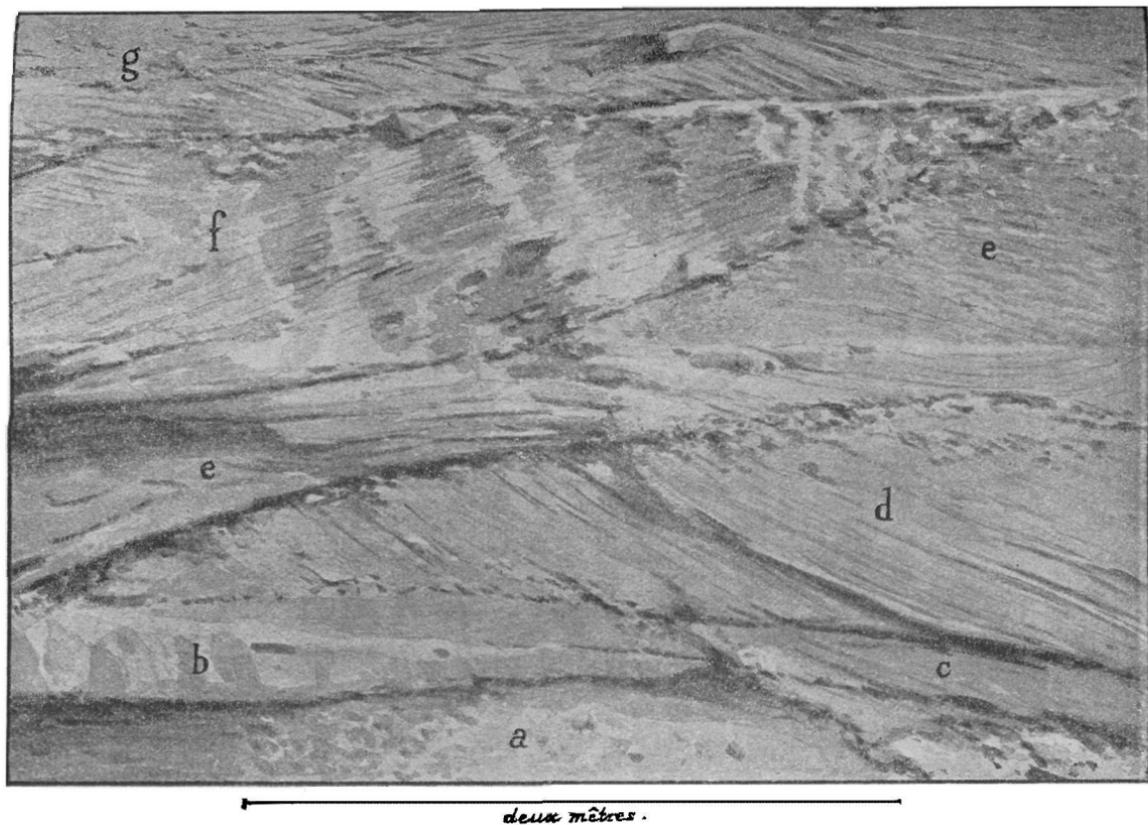


FIG 3r. — Front de taille d'une grévière ouverte dans le diluvium de Petit-Créteil (Seine) d'après une photographie de M A Dollot.
a, niveau macrolithique, *b* à *f*, zone amygdaloïde ; *g*, niveau limoneux

donnée. En effet, pendant que, dans certains points, le cours d'eau déplace des matériaux, dans d'autres points, qui peuvent être très voisins des premiers, les matériaux exondés sont soumis à la réaction des eaux d'infiltration qui, en s'y insinuant, introduisent dans leurs interstices les limons d'origine atmosphérique en même temps qu'elles en modifient plus ou moins profondément la structure primitive. D'un autre côté, le ruissellement des eaux sauvages et surtout les épanchements des inondations, en édifiant, par *colmatage*, une portion de la série végétale, accumulent au-dessus du dépôt réellement fluvial un revêtement qui peut acquérir une épaisseur sensible à la faveur d'un temps suffisant. Et ici, le fait qu'il importe de retenir c'est qu'il peut toujours se constituer à un même moment dans le fond d'une vallée deux catégories de dépôts : 1° les sables et graviers charriés et déposés dans le lit fluvial aux endroits d'*eau vive* et 2° les limons épanchés dans les régions d'*eau morte* et aussi, par une suite nécessaire, dans les terres inondées temporairement en dehors du lit.

Ajoutons que dans les points d'une vallée que le déplacement des méandres a laissés intacts depuis longtemps, le terrain de colmatage peut acquérir une épaisseur relativement très grande. Il s'accroît à chaque inondation par un mécanisme qui rappelle l'allure des alluvions de la vallée du Nil. Seulement, aux environs de Paris, les agents de production ne sont pas tous identiques à ceux qui interviennent en Égypte : au lieu du Khamsin, ou vent du désert, qui apporte des pluies périodiques de sable, nous avons chez nous le déplacement des glaces d'hiver qui charrient des nappes entières de limon, de graviers et même de galets de toutes tailles.

Des trois horizons superposés dont se compose le diluvium de la Seine, il y en a un qui se signale immédiatement au regard par sa structure remarquable, en même temps que par la valeur industrielle des matériaux

qu'il livre à l'exploitation. C'est l'horizon moyen, que nous pouvons appeler le *diluvium amygdaloïde*.

Il est en effet composé, par un contraste aussi complet qu'inattendu avec la plupart des formations sédimentaires, par des sortes de lentilles ou d'amandes sableuses enchevêtrées les unes dans les autres d'une façon parfois compliquée. On est surpris de constater que dans chacune des amandes dont il s'agit, les éléments sableux sont disposés en lits parfaitement réguliers, plus ou moins obliques à l'horizon, purs ou presque purs de matière limoneuse, et toujours nettement parallèles les uns aux autres.

La dimension des lentilles, comme l'inclinaison de leurs lits, varie d'un point à un autre et quelques-unes sont si aplaties qu'elles figurent des couches proprement dites; cependant leur structure est toujours la même dans toutes les régions des balastières, quelle que soit leur orientation par rapport à celle de la vallée: ce qui veut dire que l'inclinaison des lits constitutifs est elle-même variable non seulement par sa valeur angulaire mais par sa direction. Il arrive qu'en des points très voisins, voire sur la même verticale, le plongement de ces lits est mutuellement inverse, c'est-à-dire qu'une lentille à feuillets plongeant vers la droite peut être au voisinage, ou au-dessus, ou au-dessous, d'une lentille dont les feuillets plongent vers la gauche. Mais le point essentiel à souligner, et sans crainte de répéter la même assertion fondamentale, c'est que cette variabilité s'associe à une régularité absolue et à une délicatesse extrême de structure.

A cette occasion on peut ajouter que dans chaque lentille, les petits lits constitutifs se poursuivent parfois sur des longueurs de plusieurs mètres, se distinguant les uns des autres par de très faibles variations dans la grosseur de leurs grains, de telle sorte qu'on les compare tout naturellement aux lits sableux composant les dunes.

Cette ressemblance tient à ce que le mode de formation est le même dans les deux cas, substitution faite bien

entendu de l'eau courante au vent comme véhicule de la matière arénacée.

Mais si la structure de chaque lentille est aisée à expliquer, il semble devoir en être tout autrement de celle du terrain tout entier, formé comme on vient de le dire de lentilles enchevêtrées ; et ici la comparaison avec les dunes, si exacte tout à l'heure, ne semble pas pouvoir se poursuivre.

C'est seulement en se mettant à l'étude de l'observation des phénomènes actuels qu'on trouve la clef de ce problème si longtemps poursuivi, et sa découverte justifie à un tel point la légitimité de la doctrine actualiste qu'on en arrive à poser en fait qu'il suffit d'analyser l'histologie du diluvium amygdaloïde pour en tirer la démonstration du processus progressif et lent du creusement tout entier des vallées.

Voilà qui mérite évidemment de nous arrêter un moment.

La conclusion des études auxquelles à ce point de vue j'ai soumis le diluvium de la Seine, c'est qu'il représente une série très longue de remaniements successifs, opérés dans les mêmes points par le même cours d'eau que nous avons encore sous les yeux et qui, suivant les moments, est, dans la même région, animé de vitesses très différentes les unes des autres. Cette variation de vitesse avec le temps sur un même point s'explique d'ailleurs tout de suite par l'observation contemporaine des variations de volume des cours d'eau d'un jour à l'autre, et surtout par la faculté dont jouissent les rivières de déplacer horizontalement leurs méandres.

Il résulte en effet de ces conditions diverses si universellement constatées que les choses se passent, dynamiquement parlant, dans un point fixe de la rivière qui se déplace, comme si ce point, au contraire, se déplaçait progressivement dans le lit d'une rivière supposée constante dans sa situation et dans son allure. Il est évident

qu'à ce prix il sera tantôt le théâtre de phénomènes sédimentaires, s'il se trouve dans les régions relativement tranquilles de la rivière, tantôt de phénomènes érosifs s'il est dans les régions rapides et avec toutes les intensités relatives possibles dans les deux cas.

Si nous supposons d'abord ce point dans une anse convexe du cours d'eau, il pourra se garnir de sédiments de lits plus ou moins horizontaux et qui s'ajouteront les uns aux autres tant que le régime ne changera pas trop (fig. 32, n° 1). Le lit perdra progressivement de sa profondeur et la berge pourra même s'exonder peu à peu par suite du recul progressif du courant, en conséquence de l'un des mille incidents de la divagation des méandres. Nous reviendrons tout à l'heure sur ce qui advient des régions exondées, perdues momentanément par la rivière et gagnées par la terre ferme. Pour le moment, supposons que nous ayons choisi une région placée un peu plus bas (par rapport au fil de l'eau) et où la sédimentation n'admet que des matériaux moins fins que des limons sableux et comparables à ceux que nous montraient précédemment nos coupes de graviers quaternaires.

Le déplacement des méandres a pour conséquence de changer très progressivement la condition dynamique du point que nous considérons, et il va pouvoir se faire que les filets d'eau qui le traversent soient animés d'une vitesse de plus en plus rapide. Alors, non seulement la sédimentation cessera de s'y continuer mais les matériaux déposés à cause de leur dimension et de leur poids en rapport avec la vitesse du courant qui les a engendrés seront sollicités au déplacement. En d'autres termes, là où nous venons de voir les dépôts se constituer, il se déclare peu à peu un phénomène de dénudation. Celle-ci pourra, en certains cas, enlever tout ce qui s'était déposé tout à l'heure, mais il arrivera bien souvent aussi qu'une portion du sédiment échappera à l'érosion, durera jusqu'à ce que la distance aux berges du point considéré soit telle que des

portions relativement lentes du cours s'y établissent et alors la soustraction de matière s'arrêtera (fig. 32, n° 2)

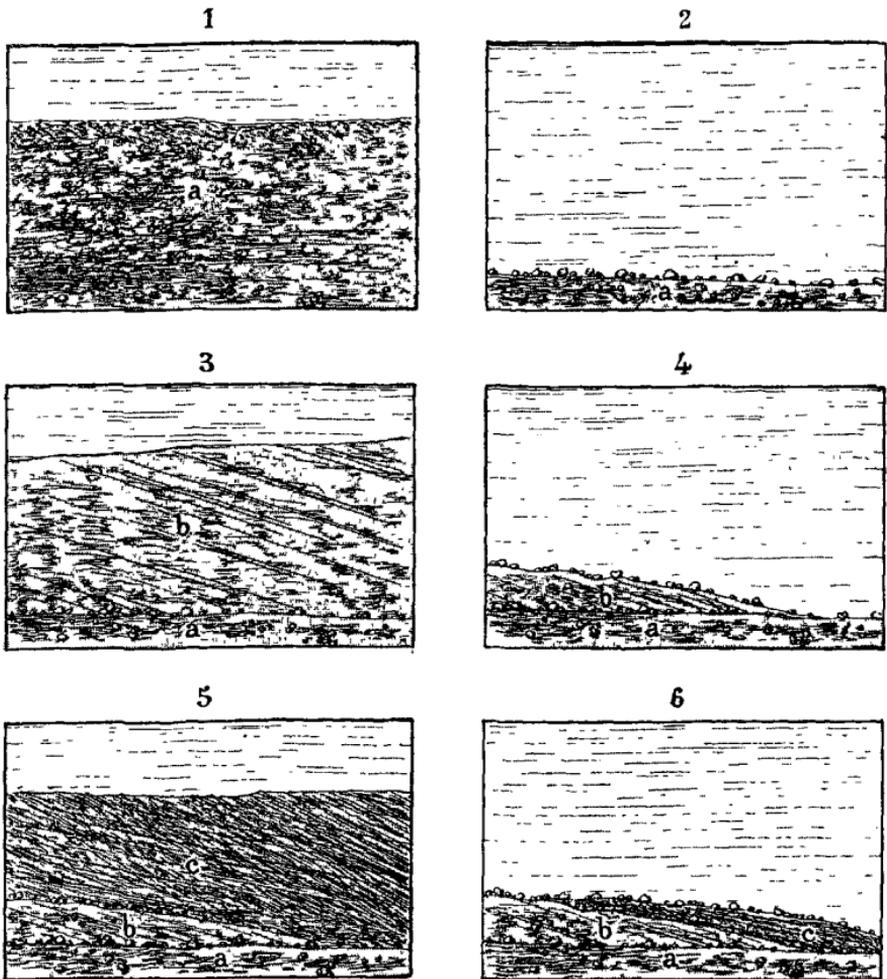


FIG. 32 — Mode de production du diluvium amygdaloïde. — N° 1, dépôt du diluvium *a* sous le régime sédimentaire propre aux anses convexes des cours d'eau ; n° 2, érosion du dépôt *a* par l'établissement du régime des anses concaves déterminé par le déplacement transversal du méandre ; n° 3, dépôt en lits inclinés du diluvium *b* sur le lambeau subsistant de la formation *a*, n° 4, érosion de *b* et d'une petite portion de *a* ; n° 5, dépôt de *c* sur les résidus de *b* et de *a* ; n° 6, érosion des dépôts précédents par le retour des conditions concaves.

Cette dénudation progressive sera d'ailleurs limitée par une surface supérieure des masses érodées dont la forme est une représentation exacte de l'état dynamique de l'eau

en chaque point du fond. Elle pourra en outre être recouverte de matériaux trop lourds pour être entraînés et qui, pour des raisons que nous indiquerons dans un instant, se seraient trouvés enveloppés dans le dépôt attaqué, et cette circonstance lui donnera une apparence très caractéristique et qui sera en même temps très significative. Les matériaux volumineux ou lourds dont il s'agit se retrouveront d'ordinaire dans la masse du dépôt non encore raviné et c'est un fait qui rend leur origine tout spécialement évidente.

C'est à chaque pas que dans les portions accessibles du lit des rivières, en temps de basses eaux, on voit des traces de l'érosion que nous décrivons et spécialement dans les rivières qui se dessèchent tout à fait ; par des sections verticales il est facile de voir la disposition des lits constitutifs du fond et de constater la forme de l'érosion que le cours d'eau leur a infligée.

En tous cas et pour en revenir à l'histoire de notre diluvium parisien — le déplacement horizontal du fleuve continuant, et avec lui le déplacement des filets d'eau animés de diverses vitesses, le point considéré a pu se trouver en rapport avec de l'eau qui, loin de continuer l'œuvre d'érosion à laquelle nous venons d'assister, a, au contraire, apporté des matériaux de sédimentation. C'est toujours péniblement, à bout de force, que cette sédimentation se réalise, car autrement les matériaux qui se déposent iraient plus loin et c'est l'occasion de répéter qu'on est émerveillé, et cela dans toute l'épaisseur du diluvium de la Seine, de la précision des séparations réalisées successivement par les courants d'eau.

Alors, la surface courbe dont nous venons de voir le mode de production est devenue la base d'appui d'un système de petits lits qui n'ont aucun lien de direction nécessaire avec celle des petits lits de l'origine. Cette fois ils peuvent être obliques (fig. 3), c'est-à-dire en discordance complète avec ce qui reste du dépôt *a*. Leur obliquité

varierait d'ailleurs avec la direction de la coupe ; dans un certain sens ils pourraient être horizontaux, de même qu'à la rigueur les lits du dépôt *a* pourraient être obliques suivant une direction convenablement choisie.

Ici encore, chaque feuillet de dépôt traduit par la grosseur de son grain l'énergie mécanique de l'eau qui lui a donné naissance. Cependant les vicissitudes locales continuant au fur et à mesure des modifications de forme du fleuve lui-même, des érosions viennent de nouveau attaquer le fond, mordant sur le dépôt à la production duquel nous venons d'assister et parfois même jusqu'à celui qui le supporte et qui, de nouveau, peut perdre une partie de sa substance. La figure 4 nous montre le résultat de cette nouvelle érosion et la forme nouvelle du lit fluvial qui lui correspond. On y voit la surface recouverte encore de débris grossiers consistant en ce que le courant dénudateur a rencontré dans le sol sous-fluvial de trop pesant pour qu'il l'emportât. Répétons que l'on verra dans un instant comment ces matériaux sont parvenus là où ils figurent.

Tous les sédiments fluviaux pourraient ainsi disparaître dans le point considéré, mais il arrive aussi qu'une portion continue à en subsister et alors, par le retour des conditions convenables, elle sera recouverte par une nouvelle sédimentation. Ce sera le dépôt *c* de la figure 5, en lits inclinés un peu autrement que ceux de la formation *b*. Et cette sédimentation pourra elle-même être plus tard dénudée, comme le montre la figure 6 dont l'analogie avec la figure 2 paraît assez caractérisée pour souligner le retour des conditions identiques avec un fond tout autrement constitué que la première fois, puisqu'il conserve la trace d'une série de phénomènes qui se sont succédé les uns aux autres.

Évidemment, nous pourrions arrêter ici cette énumération de réactions alternatives. Mais on trouvera sans doute qu'il est utile pour la clarté de la démonstration de mon-

trer comment par leur continuation, une coupe réelle peut être expliquée jusque dans ses détails les plus intimes.

A cet égard j'ai choisi une grévière sise au Petit-Créteil (Seine), près du confluent de la Marne et de la Seine : on y voit (fig. 12) les lentilles et les surfaces onduleuses qui les séparent les unes des autres. J'ai affecté à ces lentilles, à partir du bas, des lettres correspondant à celles que présentent déjà les figures 1 à 6 qui viennent d'être décrites. On peut juger par leur moyen de la correspondance déjà réalisée entre les accidents naturels et les vicissitudes que nous avons rapportées. Il est facile de terminer la coupe en quelques lignes.

Pour cela, il nous faut, après la disposition présentée par la figure 6, admettre la sédimentation indiquée par la figure 7 et qui concerne le dépôt *d* en lits inclinés à peu près comme ceux des dépôts précédents, mais formés de matériaux plus grossiers, ce qui suppose une plus grande vitesse de l'eau générative (fig. 7). Ce dépôt *d* a d'ailleurs été érodé à son tour et a perdu une grande partie de sa substance constituante. Ce qui en reste est, comme pour les dépôts précédents, terminé par une surface courbe toute parsemée de pierrailles constituant des résidus de lavage (fig. 8). Puis s'est établie la sédimentation du dépôt *e* qui, par suite de l'orientation accidentelle de la coupe, montre ses feuillets avec une horizontalité approximative (fig. 9). Une érosion nouvelle visible sur la figure 10 a été suivie à son tour du dépôt figure 11 ; le sens des feuillets de ce nouveau dépôt est précisément inverse de celui des feuillets constitutifs du dépôt *d*. Enfin l'addition du dépôt *g* est venue compléter la série observée (fig. 12).

Cette disposition « entrelacée » du diluvium moyen, loin de supposer comme on le voit, et selon le sentiment de Belgrand, l'intervention d'agents très violents, serait évidemment toute brouillée par un semblable régime. Et comme on serait sans doute peu disposé à croire sans preuve qu'un

observateur spécialiste dans l'étude du diluvium ait pu formuler une semblable opinion, on trouvera légitime

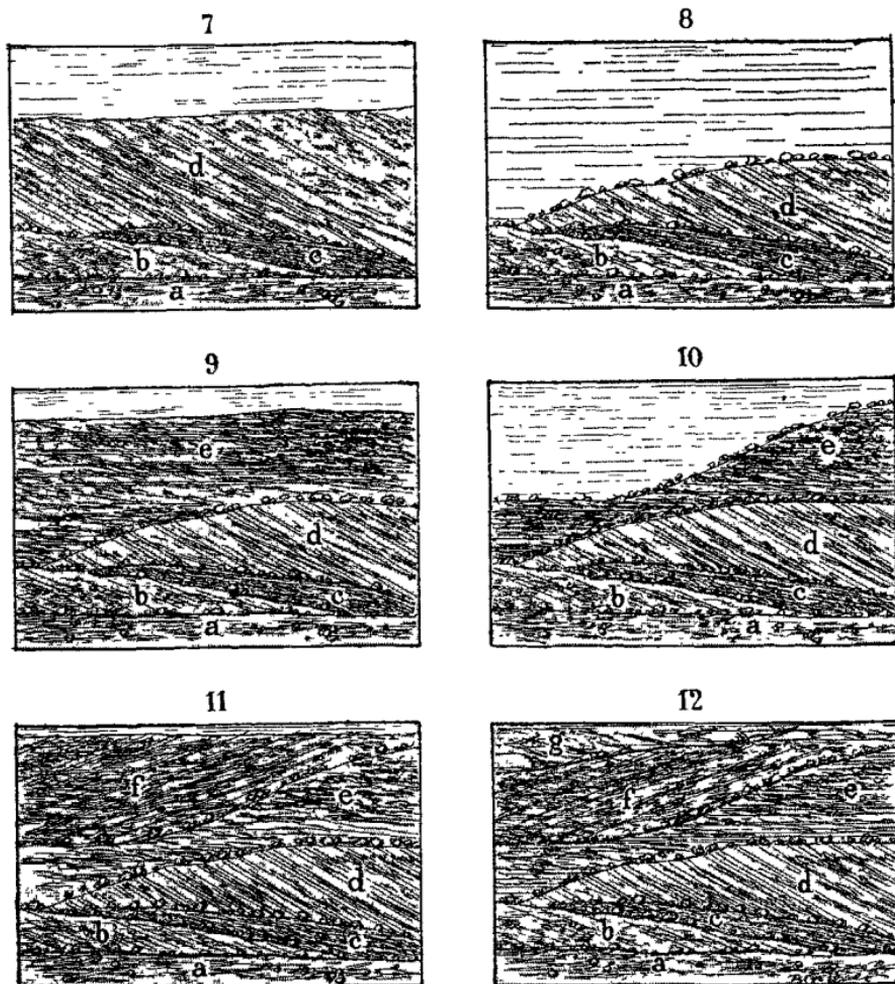


FIG. 33. — Mode de production du diluvium amygdaloïde (suite et fin) — N° 7, dépôt du diluvium *d* à la suite du retour dans le point considéré du régime convexe, n° 8, érosion partielle du dépôt précédent, n° 9, dépôt de lits peu obliques du diluvium *e*; n° 10, érosion de *e* qui ajoute une nouvelle « lentille sableuse » aux lentilles déjà formées; n° 11, dépôt de la zone *f*, n° 12, addition du dépôt *g* qui complète la série représentée dans la fig. 31 (p. 260)

que j'y insiste un instant. A la page 106 de l'ouvrage sur *La Seine*, l'auteur, constatant l'existence des lentilles sableuses dans la balastière Tarsieux à Levallois, ajoute :

« Ces bancs sont disposés en amandes ; ils ont été amenés en masse et dans une seule crue par des eaux qui tourbillonnaient autour d'un axe vertical. » Un peu plus loin, Belgrand ajoute que « cette coupe fait voir que le point du lit du fleuve était le centre d'un tourbillonnement lorsque se sont déposés les amas de sable et de graviers ». Du reste, l'auteur parle à beaucoup de reprises (par exemple p. 244) de violents tourbillons qui, *en même temps*, auraient affouillé le sol et déposé des sables limoneux. Il y a là une assertion qui semble essentiellement contraire à l'observation journalière : si un courant dénude, il ne sédimente pas au même point, sauf en laissant sur place, comme nous l'avons déjà vu, des résidus d'érosion. Il y a contradiction absolue entre la soustraction de matériaux grossiers et l'apport de matériaux fins. A chaque instant et dans chaque point, la grosseur maxima des grains, arrachés par le courant érosif, est rigoureusement réglée par la vitesse de l'eau ; de même que, dans chaque point de sédimentation, le volume des grains déposés est exactement déterminé.

Répétons donc, d'une façon de plus en plus formelle, que la disposition lenticulaire du diluvium témoigne d'une allure essentiellement tranquille, quoique constamment changeante. C'est exactement le régime qui existe dans le lit de toutes les rivières actuelles et il est facile de le constater, en temps de basses eaux ou de sécheresse dans des localités convenablement choisies. Les petits lits inclinés se voient parfaitement dans les excavations faites pour recueillir le sable actuel et j'en ai relevé, par exemple, dans le lit desséché de l'Allier, aux environs de Coudes (Puy-de-Dôme) qui étaient tout à fait identiques pour la disposition à ceux du diluvium de la Seine.

Reste à dire un mot des blocs relativement gros ou même très gros, qui, comme nous l'avons dit, et comme tout le monde le sait, sont associés à la masse du diluvium amygdaloïde. L'observation démontre avec certitude qu'ils

ont été amenés autrement que par l'intermédiaire de l'eau courante agissant seule. Bien souvent ils représentent des résidus, restés à peu près sur place, de la dénudation subie par le sol sous l'influence des divers agents de dégradation, et les éboulements des berges de la rivière doivent être spécialement mentionnés. Mais fréquemment aussi, ils ont été transportés, ainsi qu'on l'a remarqué bien des fois, par des glaces flottantes et nous pouvons observer le phénomène chaque hiver, toutes les fois que, selon l'expression vulgaire, la rivière *charrie*. En outre, des radeaux naturels constitués par des arbres arrachés des rives avec leurs racines sont également des agents de transport, sans parler des hommes qui, depuis le commencement des temps quaternaires, ont dû jeter des pierres dans l'eau, comme ils continuent de le faire de nos jours.

On est très frappé de la situation des blocs de toutes tailles et relativement volumineux (fig. 34) comparés aux autres éléments du diluvium et j'ai réuni à cet égard des éléments photographiques d'une haute signification. D'habitude, les blocs sont placés sur des ensembles de lits minces, horizontaux ou obliques qui n'ont pas été notablement modifiés par eux et cela encore est essentiellement différent de l'état de choses dans les torrents où, comme nous le rappelions tout à l'heure, les gros blocs sont toujours à la tête de traînées de matériaux plus fins, disposition qui s'explique d'elle-même, puisque les blocs ont nécessairement constitué des obstacles au voisinage desquels l'allure de l'eau rapide a été toute particulière.

Dans nos grévières, la présence des blocs de toutes tailles, concentrés déjà, comme nous l'avons dit en lits qui font la base des lentilles sableuses, conduit en outre à une remarque importante sur la structure des régions inférieures des amas de diluvium de la Seine; — structure sur laquelle Belgrand a émis une opinion si insoutenable.

Cet auteur constate, en effet, que les gros galets, les

blocs volumineux de toutes sortes sont volontiers concentrés dans le « gravier de fond » et il en tire des consé-

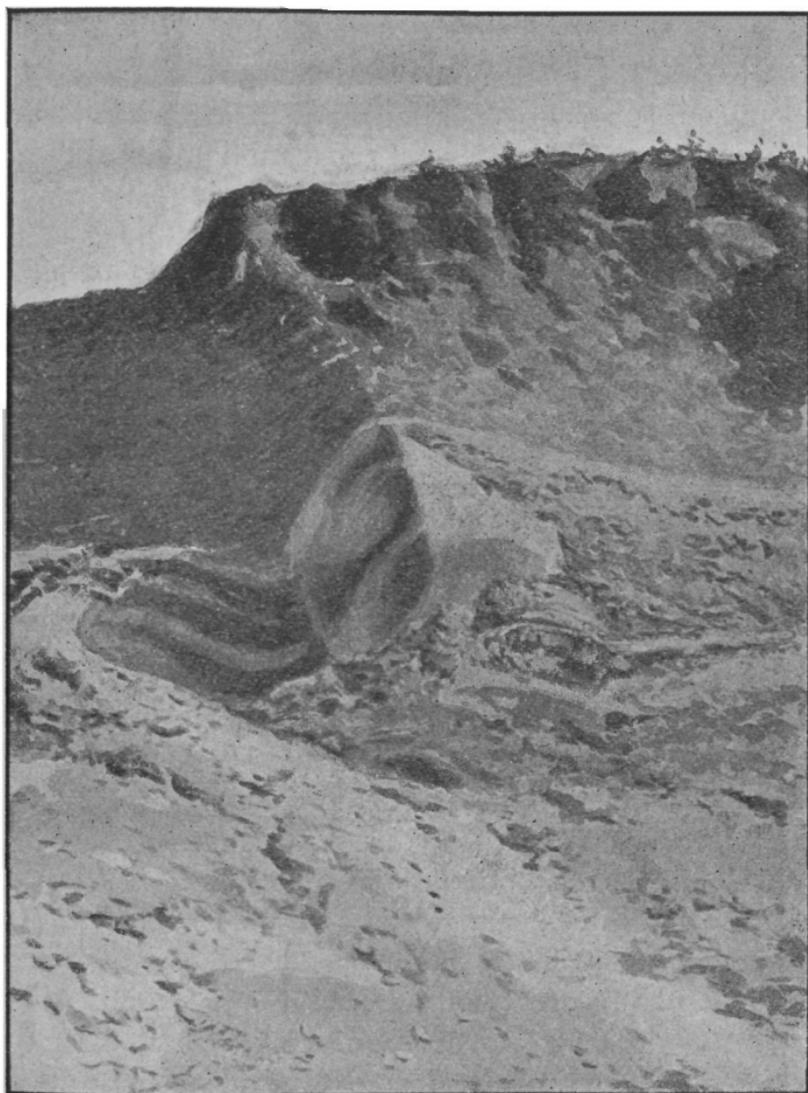


FIG. 34 — Gros bloc compris dans le diluvium amygdaloïde de Créteil, d'après une photographie de M. Dollot. On voit qu'il n'a pas interrompu la régularité des lits inclinés au milieu desquels il s'est enclavé.

quences quant à la violence spéciale des cours d'eau au début du remplissage de la vallée, remplissage qu'il semble

toujours porté à comparer à l'engorgement d'un égout préalablement creusé. Frappé de l'abondance des silex taillés de main d'homme dans cette zone il arrive à formuler (*La Seine*, p. 154) la supposition de *deux déluges successifs*. « En effet, ajoute-t-il, les eaux courantes ne rassemblent jamais les objets lourds de même origine, elles les dispersent; les objets légers, ceux qui flottent sur l'eau, peuvent atterrir en abondance à certains points favorables, mais ceux qui sont entraînés en roulant au fond avec les graviers sont dispersés comme les graviers eux-mêmes. » Sans discuter ces assertions, dont il serait très facile de montrer l'inexactitude, nous remarquerons que bien évidemment ces régions macrolithiques du diluvium de la Seine représentent les résidus, progressivement accumulés, de la dénudation successive dont nous indiquions tout à l'heure les différentes étapes. Petit à petit les parties relativement fines sont emportées et les fragments plus pesants subsistent de plus en plus rares et descendent progressivement, constituant de haut en bas des nappes infralenticulaires de plus en plus profondes. Les progrès de ce lavage expliquent la liaison si intime que tout le monde a constatée entre les « graviers de fond » et le diluvium lenticulaire ou « sable gras ». Ces mêmes progrès manifestent en même temps la tendance à la concentration dans les lits les plus bas de tout ce qui est lourd : galets, éclats de roches, haches de pierre, gros ossements, etc. Chaque érosion du dépôt déjà fait et qui détermine la forme inférieure d'une lentille future, peut laisser, comme trop pesants, certains matériaux, et c'est pour cela que nous avons vu des surfaces d'érosion ainsi revêtues de nappes de galets. Dans le cas où le dépôt a été dénudé totalement, les galets seuls peuvent subsister sur le fond. Mais jamais, dans aucune circonstance, le courant de la Seine ne semble avoir pu charrier, comme le pensait Belgrand, les gros éléments du diluvium.

Nous constatons toujours dans les coupes offertes à

notre examen par les balastières que les zones dont on vient d'avoir la description sont surmontées d'une épaisseur plus ou moins grande de sables et de graviers qui passent, par le haut, à des limons sableux et même caillouteux, Belgrand leur a donné le nom de « sables de débordement » qu'on peut leur conserver à la rigueur, quoique le mécanisme du débordement soit loin de coïncider exactement avec celui que supposait l'auteur.

Quoi qu'il en soit, ces lits supérieurs ont pour nous un intérêt très spécial, car ils constituent au propre la terre végétale des plaines d'alluvion et il est fort utile de préciser leur mode de formation. A cet égard, il importe de remarquer que les portions limoneuses quoique caillouteuses, que recouvre la terre arable, se soudent par en bas d'une façon intime avec du diluvium dépourvu de la structure amygdaloïde et qui, avec une épaisseur parfois très grande, semble déjà indiquer un régime différent de celui qui a présidé à l'accumulation du diluvium moyen.

Il est facile de s'expliquer cette circonstance en se reportant par la pensée au voisinage du fleuve, sur la berge convexe d'un méandre en voie de déplacement. Les sables viennent s'y déposer de plus en plus fins à mesure que la ligne de grande vitesse s'éloigne et les limons s'y superposent bientôt, constituant une avancée progressive de la terre ferme qui entoure la boucle de la rivière. Celle-ci n'a pas renoncé encore à venir la submerger de temps en temps ; à chaque inondation elle s'y épand, mais presque sans vitesse et elle est seulement capable, loin de l'éroder, d'y déposer de fines particules limoneuses ; c'est le « terrain de colmatage » qui vient se superposer à la nappe de sable diluvien correspondant au dernier régime de berge convexe. Cette masse de colmatage est loin d'être homogène ; elle contient, et parfois en abondance, des sables, des galets et même des blocs de roche plus ou moins volumineux. Mais cette particularité s'explique d'elle-même par le rôle des glaces flottantes et il suffit par

exemple d'avoir visité la plaine d'Alfort dans des conditions convenables, c'est-à-dire lors des inondations d'hiver, pour y avoir observé, au moment du dégel, des plaques de glace paresseusement charriées dans tous les sens et éparpillant, sur tout le fond inondé, de la boue, des sables, des pierrailles de toutes natures, qui s'incorporent bientôt dans le sol. Alors que les travaux d'endiguement et de régulation des lits n'entravaient point comme aujourd'hui le phénomène, il devait se développer sur une échelle considérable qui explique bien la constitution constatée du sol alluvionnaire.

En résumé, on voit d'après ce qui précède que le diluvium de la Seine se divise de lui-même en trois niveaux superposés qui ont été distingués du premier coup d'œil par tous les observateurs, mais qui, contrairement à l'opinion que ceux-ci ont généralement défendue, ne supposent quant à leur origine aucune action différente par sa cause ou par son intensité, de celles qui interviennent encore sous nos yeux.

Chacun des types caractéristiques de ces trois niveaux continuent à se produire à l'époque présente: les *graviers de fond* dans les régions d'érosion active au milieu du lit ou dans les anses concaves, là où le lavage successif des matériaux a été poussé jusqu'à l'isolement des éléments les plus gros et les plus pesants; — les amandes sableuses, limoneuses ou caillouteuses, dans les divers points du lit à circulation compatible avec la sédimentation active; parfois avec persistance au-dessous d'elles de portions plus ou moins épaisses de sables de débordement, et le ravinement de ceux-ci n'a pas persisté assez longtemps avant le dépôt des lentilles; — c'est un cas de récurrence dont il faut concevoir la possibilité à chaque instant; — les *nappes limoneuses*, arénifères et caillouteuses supérieures, hors du lit, dans les régions accessibles seulement aux eaux d'inondation.

Bien entendu ces nappes sont normalement destinées,

à la faveur du déplacement des méandres, à subir les lavages décrits plus haut qui les réduiront à l'état de dépôts amygdaloïdes lesquels eux-mêmes passent à leur tour à l'état de gravier de fond par une véritable évolution tranquille dont l'allure est bien faite pour frapper et satisfaire l'esprit.

Et l'on pourrait résumer toute cette série de transformations successives en constatant que le dépôt du diluvium s'est poursuivi sans interruption, avec la même allure, pendant tout le temps du creusement de la vallée, durant lequel il n'y a nulle place pour un phénomène violent. D'un autre côté, nous retrouvons identiquement la même structure, avec les mêmes dimensions en largeur comme en épaisseur des masses constituantes dans le diluvium des « hauts niveaux » comme au Kremlin (Gentilly) et à Montreuil, — dans celui des « bas niveaux » comme au Petit Créteil et à Grenelle; et d'un autre côté, nous constatons la liaison intime des divers niveaux superposés dans la formation diluvienne.

Il y a donc, dans toute cette intéressante histoire, une simplicité et une continuité qui contrastent singulièrement avec la première conclusion d'observations trop hâtives. Là où, tout d'abord, on voyait des témoignages de courants monstrueux par leur volume et par leur violence, nous ne trouvons au contraire que la preuve de la longue persistance du régime encore à l'œuvre sous nos yeux. A notre sens, l'analyse attentive de la structure intime du diluvium suffit, à elle seule, et sans le concours d'aucune autre considération, pour faire repousser toutes les hypothèses diluviennes successivement présentées, même avec les modifications par lesquelles, depuis Belgrand, on a essayé tant de fois de les amender.

L'histoire de la sédimentation fluviale est une de celles où la légitimité de la doctrine actualiste apparaît avec le plus d'évidence.

Ajoutons que les premières étapes du phénomène de creu-

sement d'une vallée peuvent facilement être conclues de l'examen que nous venons de faire de la nappe superficielle.

A l'origine, le sol qui vient de sortir de la mer peut être considéré comme tout à fait horizontal : la pluie qui y tombe tend à y séjourner. Cependant les inégalités de composition, accentuées bientôt par les solubilités diverses, amènent tout de suite un écoulement, et celui-ci augmente successivement et très vite les irrégularités du terrain. La nappe d'eau imprègne les portions perméables résultant en partie de la désagrégation des roches et reproduit la forme générale de la surface. Pourtant elle tend tout de suite à s'épaissir dans les régions creuses, à s'amincir dans les points possédant un relief relatif. En chaque région la vitesse de l'eau, liée intimement à la pente, déplace des particules plus petits qu'une dimension déterminée, et parfois un filet aqueux apparaît au jour par balayage des limons, des sables, des graviers. Il en résulte un réseau de filets d'eau qui ne sont que des éléments de la nappe plus ou moins continue dissimulée ailleurs par les matériaux pierreux dans lesquels elle est enfouie. Le maximum de ce nettoyage se produit dans les fonds de vallée de tous ordres et c'est ainsi que se maintient le réseau de ruisseaux et de rivières distribués à gauche et à droite du sillon principal qui est le fleuve.

On s'imagine souvent le travail de creusement de la vallée réalisé par un filet d'eau qui agirait extérieurement sur le sol et y pénétrerait, tandis que c'est bien plutôt le résultat d'une espèce de sapement de portions superficielles par de l'eau qui en grande partie imprègne le sol et modifie la surface en agissant au-dessous d'elle.

J'ai eu l'occasion, à propos de l'érosion fluviale, de faire à Mléty, sur le versant Sud de la chaîne du Caucase, des observations qui peuvent trouver place ici en nous conduisant à une conception générale du phénomène.

Dans la localité que je viens de nommer, passe une belle rivière appelée Aragva et qui un peu plus bas se

jette dans la Koura, pour traverser sous ce nom la ville de Tiflis. L'escarpement formé par la berge sur la rive gauche à Mléty montre sur 6 mètres environ de parcours une accumulation de graviers et de galets à faciès tout à fait diluvien, puis, au-dessus, une coulée volcanique de 4 mètres d'épaisseur, formée d'une andésite largement cristalline.

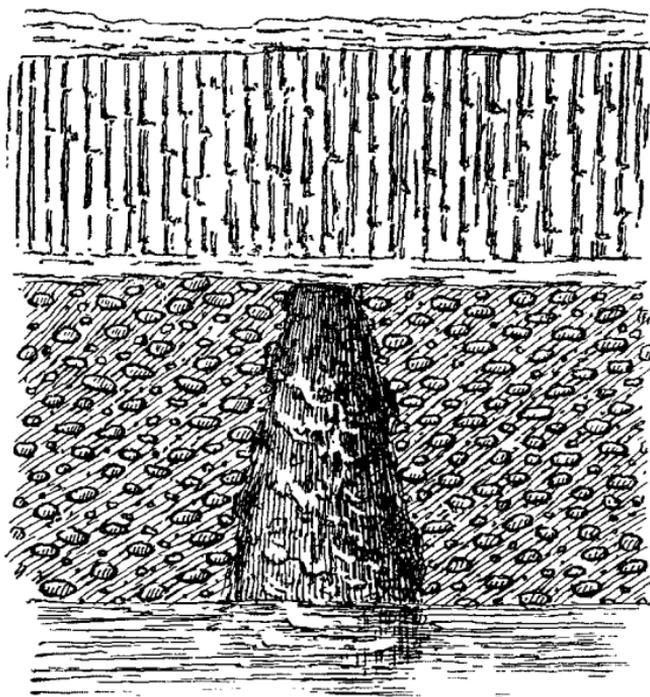


FIG 35 — Escarpement de la rive gauche de l'Aragva aux environs de Mléty dans le Caucase

Une semblable coupe présente, entre autres motifs d'intérêt, le mérite de faire toucher du doigt, pour ainsi dire, le mécanisme à la fois énergique et continu de l'érosion fluviale. A ce titre les faits qu'elle nous révèle viennent s'ajouter à ceux que Poulett-Scrope, à la suite de Daubuisson de Voisins, a si admirablement décrits pour notre plateau central et suffisent pour faire condamner à tout jamais les hypothèses de cataclysmes diluviens.

Si l'on cherche à comprendre comment les masses constitutives de cette coupe de Mléty ont pu prendre les situations relatives qu'elles nous présentent aujourd'hui, on arrive sans peine à y retrouver le témoignage de deux régimes très différents qui ont régné successivement sur le même point : d'abord un régime fluvial d'où datent les galets, puis un régime volcanique auquel se rapporte la coulée. Mais on en conclut, en même temps, de remarquables changements dans le profil de la surface du sol et c'est là le point sur lequel il convient surtout de fixer notre attention.

En effet, les galets et les graviers ont nécessairement été charriés sur un fond de vallée, et le point qui maintenant est en saillie sur le niveau général du pays était, au contraire à cette époque, encadré par des reliefs qui dirigeaient le cours d'eau. La lave volcanique, s'écoulant des hauteurs, a de même été sollicitée par la déclivité du terrain et est venue s'étendre dans le lit fluvial dont elle a recouvert les pierrailles.

Mais depuis lors, et sans qu'il y ait eu aucun changement dans l'économie de la région, les choses ont pris un tout autre caractère et l'ancien thalweg est devenu une crête entre deux dépressions où circulent les eaux et où couleraient les laves, si les foyers volcaniques en amenaient quelque jour à la surface. C'est que le puissant revêtement d'andésite s'est constitué à l'état d'organe protecteur du terrain qu'il recouvrait, contre les entreprises continues de l'intempérisme. Celui-ci a d'abord abaissé progressivement le relief des deux lignes de faite bordant le cours fluvio-volcanique à droite et à gauche et il y a eu un moment où, pour chaque point de ce cours, la dépression n'existait plus. Puis, peu à peu, le sens du relief relatif a changé et le thalweg s'abaissant très peu, à cause de sa résistance, il a fait petit à petit saillie sur le pays d'alentour.

Une semblable constatation suffirait pour montrer

comment les théoriciens ont commis souvent de graves erreurs en voulant préciser, par exemple, les phases successives de l'érosion et surtout en cherchant à montrer comment, par le jeu de forces en action dans un cours d'eau, la forme de sol marche vers un profil d'équilibre qui sera définitif.

On voit qu'il suffit d'un incident, comme l'arrivée d'une coulée de lave, pour que toute cette évolution soit compromise par la substitution de points résistants, aux points les plus faciles à attaquer au début ; le même résultat sera produit, dans certains cas, par le décapage même du sol qui mettra au jour des lits de dénudation difficile déterminant le transport sur des lignes nouvelles du maximum de l'activité érosive.

C'est l'occasion de répéter qu'une illusion de beaucoup de théoriciens a été de raisonner comme si le cours d'eau existait seul, indépendamment de tout le système des eaux ruisselantes et des eaux d'infiltration, dont il n'est en réalité qu'un tout petit détail.

Dans l'étude de l'érosion fluviale, on est ordinairement porté à considérer l'eau des rivières et des fleuves comme s'écoulant, passivement pour ainsi dire, sous l'influence de la pesanteur et comme si cette eau n'était pas animée en chaque point d'une vitesse qui lui vient des particularités des régions supérieures de la nappe aqueuse. La conséquence c'est qu'on se la figure toujours empressée à gagner les points les plus bas, qu'elle tendrait d'ailleurs à combler à l'aide de matériaux fournis par les points hauts, jusqu'à ce qu'elle ait donné à son lit l'utopique *profil d'équilibre* que l'on sait. Mais il suffit d'ouvrir les yeux pour voir que, dans une foule de cas, l'allure de la rivière ne répond pas à cette description ; il semble parfois qu'elle éprouve, en conséquence de sa force vive, comme une attraction vers les points hauts, auxquels elle s'attaque jusqu'à ce qu'elle en ait eu raison et qu'elle se soit frayé un chenal au travers de leur masse.

Parmi les innombrables exemples qu'on pourrait citer, je choisirai celui de la Seine aux environs d'Elbeuf, parce qu'on est là aussi loin que possible de toute région torrentielle. On y voit le fleuve attaquant sans relâche le pied des hautes falaises qui bordent sa rive gauche. L'érosion se poursuit sans cesse et des points très hauts du pays et qu'on aurait dû croire à l'abri de toute action fluviale ont déjà disparu, pendant que d'autres sont appelés à disparaître plus ou moins prochainement. Il y a ici diminution et suppression possible du haut-relief miné par sa base et, par conséquent, substitution du lit du fleuve à une ligne de partage des eaux. Ce phénomène, si éminemment favorable à des incidents comparables à ceux qui accompagnent la capture des rivières, est évidemment incompatible avec la théorie d'apparence si savante, mais en réalité si inexacte, à laquelle nous venons de faire allusion. Tout concourt à démontrer que dans les régions soumises au régime sub-aérien, l'érosion n'a pas de « terme ». L'usure du sol se continue en changeant le siège de son maximum et amène elle-même, et comme conséquence du nivellement qu'elle tend à produire, la constitution de nouveaux reliefs relatifs, destinés à disparaître à leur tour.

5 — LA FONCTION OCÉANIQUE PENDANT LES TEMPS GÉOLOGIQUES

La plus grande masse des terrains stratifiés est d'origine marine ou lacustre et cette remarque suffit pour indiquer la persistance de la fonction océanique à travers les temps géologiques.

Dans certains cas, la ressemblance des sédiments des époques antérieures à la nôtre est si parfaite avec les sédiments d'aujourd'hui qu'on ne saurait trouver un caractère propre à les en faire distinguer. En rapprochant

des sables du rivage breton, par exemple, des sables tertiaires, secondaires, ou même plus anciens encore, on trouve une identité absolue : même composition, même calibre de grain, même structure des dépôts.

Il n'y a pas besoin d'aller plus loin pour être en droit d'affirmer qu'il s'est toujours exercé dans la mer de certaines fonctions qui persistent encore sans changements et on retrouve dans les couches du sol, et pour tous les moments de l'évolution terrestre, des conditions locales propres à chaque catégorie de régions sous-marines. C'est ainsi qu'on est arrivé à établir la doctrine des faciès marins, dont la considération a paru devoir être immédiatement applicable à l'établissement de la paléogéographie.

Les amas de galets par exemple ne sauraient s'expliquer qu'en transportant, aux époques dont ils dépendent, tout le mécanisme qui sous nos yeux donne naissance à des galets et dès lors on est en droit d'affirmer que les localités à galets sont des points littoraux des océans qui les ont roulés. Dans le terrain dévonien, pour citer un exemple presque au hasard, le bourg de Fépin, dans les Ardennes, où l'on exploite des poudingues, semblables à celui qu'on obtiendrait en cimentant la haute plage de Dieppe, est certainement établi sur un point qui fut au niveau de la mer dévonienne. Et les exemples du même genre sont innombrables.

De même les localités d'un âge déterminé dont les roches sont arénacées, sables ou grès, doivent être considérées comme analogues à celles où, comme à Dieppe, la situation littorale est aussi bien démontrée que pour les précédentes : parfois la démolition du rivage a donné directement des sables dont les grains étaient engagés dans la pâte d'une roche qui s'est désagrégée : d'autres fois, ce sable est un produit de trituration plus parfaite que les galets retrouvables au voisinage, et alors on peut affirmer que les galets étaient encore plus littoraux que les sables.

Enfin, si le sédiment consiste en un limon plus ou moins

fin, il pourra nous démontrer que le dépôt en a été opéré sous une épaisseur d'eau relativement médiocre, suffisante cependant pour intercepter l'agitation des vagues, et par conséquent susceptible d'une évaluation numérique approchée.

Et ce qui pourra ajouter à la signification de semblables remarques, c'est que parfois cette *trilogie littorale* comme on peut l'appeler, et que constituent les bandes juxtaposées et en partie superposées, des galets, des sables et des limons, — se retrouvera dans bien des pays et à bien des niveaux avec ses caractères essentiels.

Déjà près de Paris nous en pourrions citer bien des exemples : les galets d'Auvers (Oise) sont surmontés des sables de Beauchamp, puis des dépôts fins à *Avicula Defrancei*. A La Fère (Aisne) les galets verdis de silex sont recouverts de 3 mètres de sables coquilliers, puis de 4 mètres de marnes de Marquégglise à *Ostrea heteroclita*. Le bajocien de la Meurthe-et-Moselle montre normalement des marnes sableuses à *galets*, recouvertes de calcaire *sableux* à *Pecten personata* et par-dessus les calcaires oolithiques à *Ammonites Humphriesianus*. Le trias d'Audincourt (Pas-de-Calais) montre sur le dévonien immédiatement sous-jacent, d'abord un poudingue à ciment rouge et à galets calcaires, puis des grès, puis des argiles rouges et jaunes. D'ailleurs la succession normale des niveaux du trias lorrain : *poudingue* des Vosges, *grès bigarré*, *muschelkalk* rentre dans le même type général. Pour le permien, Ramsay a donné la coupe du Staffordshire où l'on voit un conglomérat de blocs ayant parfois 1 mètre de diamètre recouvert d'abord de grès bariolé (*inferior new red sandstone*) puis de calcaire fin à *Productus horridus*. A Mor-teau, dans la Loire-Inférieure, nous avons vu les poudingues dévoniens à galets de quartz laiteux et de schiste, recouverts de grès, puis de schistes très fins et très micacés où l'on recueille les empreintes de végétaux du Culm. Dans le dévonien, la *grauwacke* de Montigny

est normalement recouverte des grès noirs de Vireux, puis des schistes rouges visibles dans cette même localité. On sait qu'en Normandie le silurien débute par les arkoses de Bretteville, pour se continuer par les grès armoricains et les schistes à calymènes.

Avec une certitude tout aussi grande, on détermine des points pélagiens dont les dépôts sont d'une finesse extrême ou même des points abyssaux dans lesquels presque rien n'a été apporté mécaniquement, où tout est d'origine chimique ; — détermination faite par comparaison avec les résultats procurés par les sondages sous-marins des croisières scientifiques.

Les faciès marins sont d'ailleurs déterminés, pour une bonne part, par les catégories de fossiles relatifs à chacune des régions océaniques que l'on distingue de nos jours et dont les analogues existaient en d'autres temps. Il est clair que les bancs d'huîtres sont côtiers, que les récifs madréporiques sont pélagiens, et que les vases à foraminifères et à radiolaires sont abyssales.

Pour les dépôts pélagiens, Gressly a distingué avec avantage le faciès vaseux et le faciès coralligène dont le premier est marneux ou argileux et l'autre calcaire ; dont le premier présente des pélécy-podes libres et des gastropodes à test remarquablement mince et fragile et l'autre des polypiers, des crinoïdes, des échinides.

A Valfin, près de Saint-Claude, dans le Jura, on trouve en plein terrain kimméridgien de véritables récifs de coraux semblables à ceux qui vivent actuellement dans l'Océan Pacifique : sur 50 mètres d'épaisseur, on voit se succéder des assises qui reproduisent tous les traits essentiels des constructions madréporiques actuelles. La *Pierre blanche* de Bourges est un véritable récif rempli de polypiers. Dans le carbonifère du Boulonnais et de l'Ardenne, des atolls, des récifs barrières, se retrouvent, malgré l'antiquité du sol, malgré les profondes altérations que le temps y a accumulées, et le plan qu'a dressé de la dernière

de ces régions M. Édouard Dupont semble découpé dans la carte de l'Océanie contemporaine.

Pour les dépôts abyssaux on peut, comme nous l'avons fait à l'égard de la période actuelle, distinguer les formations rattachables aux vases calcaires à *Globigérines* et celles qui sont comparables aux vases siliceuses à radiolaires.

L'horizon remarquablement épais que, dans le tertiaire, on désigne sous le nom de nummulitique, doit pour une bonne partie de sa surface être compris dans la première catégorie : le Mont-Perdu dans les Pyrénées, la chaîne Libyque en Égypte en sont des échantillons éloquents à côté desquels il est inutile d'en mentionner d'autres. Une grande partie de la craie entre dans la même sorte de formations et se signale par son analogie complète avec les vases actuelles des abîmes atlantiques. Il est vrai qu'à cet égard quelques géologues ont défendu la thèse contraire : ils ont découvert dans la craie une abondance plus ou moins grande de sable quartzeux et ils en ont conclu que cette roche est de formation « terrigène », c'est-à-dire qu'elle contient une constitution qui lui a été apportée par les courants des côtes qui ne pouvaient pas être très éloignées.

Il y a là une faute de raisonnement qu'il importe de signaler. D'abord il peut y avoir du sable dans les mers les plus profondes en conséquence du processus éolien dont nous avons parlé antérieurement. Il est clair qu'aux environs du Cap Vert et de Ténériffe les pluies de sable mélangent contamment des grains de quartz venant du Sahara au sédiment des grands fonds. Mais il y a plus et nous avons déjà insisté sur la faculté dont jouit la silice de se constituer au sein de la craie, ou plus exactement au sein des fossiles qu'elle contient, sous des formes qui ne sauraient être distinguées tout de suite de celles des sables ordinaires. On s'est laissé prendre à cette circonstance et la conclusion formulée ne subsiste pas. On doit donc revenir à l'opinion de Constant Prévost, qui

avait reconnu dans la craie les caractères essentiellement abyssaux.

Nous avons bien d'autres types de roches à foraminifères présentant le faciès des grands fonds, et jusque dans les terrains les plus anciens. C'est ainsi que des assises carbonifères extrêmement épaisses et d'une extension géographique considérable sont littéralement pétries de tests de fusulines : elles dépassent 500 mètres d'épaisseur à Moscou et 800 dans l'Oural ; nous en avons dans les Alpes Orientales d'après M. Stache et j'en ai étudié moi-même à Cussy en Morvan (Saône-et-Loire). Mais on peut retrouver des faits comparables jusque dans le silurien qui, par exemple, dans l'Indiana et au Canada, s'est montré riche en foraminifères du sommet jusqu'à la base. Et si l'éozoon est vraiment un organisme animal, la remarque s'étend jusqu'aux sédimentations initiales.

Pour ce qui est des vases siliceuses à radiolaires et à éponges siliceuses, les conclusions sont les mêmes. On en a reconnu à tous les niveaux géologiques. Rappelons seulement, dans le jurassique supérieur, les calcaires gris siliceux à radiolaires des Alpes ; les calcaires noirs à silex du lias de la Lombardie ; les *kieselschiefer* dévoniens de Dillenburg en Nassau ; les silex à radiolaires du silurien écossais et même les phthanites cambriens des environs de Lamballe (Côtes-du-Nord) où M. Cayeux a décrit des corps microscopiques qu'il considère comme des radiolaires.

Et c'est en conséquence d'observations de ce genre qu'on a nourri l'espoir de dessiner la carte géographique des mers à des époques distinctes les unes des autres. Les tentatives faites dans cette voie sont bien peu sérieuses et il semble qu'on ne doive aucunement les encourager car elles sont plutôt propres à donner des idées inexacts aux étudiants qu'à servir les recherches futures.

C'est en effet une preuve de discernement peu sûr que la prétention de dessiner un littoral ancien en rejoignant

par des courbes tous les points littoraux connus d'une même époque. L'observation contemporaine nous a montré que, dans bien des cas, la ligne de côte génératrice du cordon de galet est en voie de déplacement continu. Il en résulte que des cordons se constituent sans cesse au contact les uns des autres et que la mer se borne d'une nappe de galets qui peut devenir très large. Deux points pris au hasard sur cette nappe sont situés sur une droite qui, dans l'immense majorité des cas, n'aura aucune analogie avec la direction du littoral.

Cependant il convient de reconnaître que dans quelques circonstances, malheureusement des plus rares, on a eu des documents plus certains ; et, par exemple, quand on a trouvé des vestiges évidents de falaises fossiles. Auprès de Calais, à Sangatte, la falaise actuelle de craie présente sur son flanc une disposition bien remarquable, étant compliquée d'une falaise moins haute au pied de laquelle se sont accumulés des galets quaternaires, maintenant compris dans l'escarpement actuel (fig. 36).

Prestwich a donné une coupe bien connue, prise aux environs de Sutton, en Angleterre, et qui montre des faits analogues pour les temps pliocènes : des falaises s'y succèdent associées à des lits de blocs remaniés qui sont tout à fait éloquents.

Pour l'époque des faluns nous avons une coupe classique à Pontlevoy, dans Indre-et-Loire, où une falaise entaillée dans le calcaire lacustre miocène, d'ailleurs criblé de perforations de coquilles lithophages, est bordée d'une épaisse accumulation de sables à fossiles littoraux.

Un très joli exemple de falaise éocène se montre dans Seine-et-Marne aux alentours de Château-Landon. La craie jaune et dure y est entaillée verticalement de façon à dominer une vraie plage de galets cimentés entre eux pour constituer le célèbre poudingue de Nemours.

De pareils exemples pourraient être multipliés pour des époques géologiques de plus en plus anciennes.

Les témoignages de la dénudation marine ancienne sont de nature très diverse. Outre les falaises déjà mentionnées, il y a lieu de citer les roches usées par les vagues et parfois perforées de ces cavités désignées sous le nom pittoresque de marmites de géants. Leur détermination, et surtout la distinction qu'on en doit faire d'accidents analogues rattachables aux glaciers, s'appuie d'ailleurs sur des observations plus larges et par exemple sur la rencontre de traces animales caractéristiques, telles

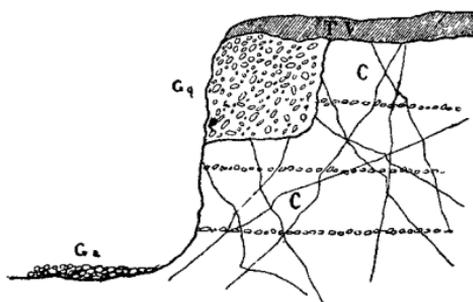


FIG 36 — Coupe de la falaise de Sangatte (Pas-de-Calais) comme exemple d'un rivage antérieur à l'époque actuelle TV, terre végétale, c, c, craie blanche Gq, galets quaternaires, Ga, galets actuels

que les cavités creusées par des animaux plus ou moins comparables à nos pholades, à nos oursins livides, à nos cliones et aux autres êtres que nous qualifions de lithophages.

De semblables perforations, déjà mentionnées tout à l'heure pour le cas de Pontlevoy, se retrouvent aux horizons les plus variés, depuis la craie de Norwich percée de trous de pholades jusqu'au calcaire lacustre de Saint-Ouen qui, autour de Paris, là où il est recouvert par les sables infragypseux jusqu'aux couches bathoniennes de Normandie qui, comme Deslonchamps l'a signalé le premier, sont criblées de lithophages calloviennes et même jusqu'au carbonifère de la Nouvelle Écosse, si précisément étudié par Dawson.

La signification de ces accidents est d'autant moins

douteuse qu'en leur voisinage se présentent fréquemment d'autres traces littorales et avant tout les bancs de fossiles fixés à la manière des huîtres. On aurait ici les transitions les plus insensibles entre les faits actuels et des particularités fort anciennes, et dans la série on citerait les bancs de moellons pliocènes de Biot (Alpes-Maritimes), les couches miocènes à *Ostrea crassissima* du midi de la France et du Tell d'Algérie, les bancs éocènes d'*Ostrea bellouacensis* du Soissonnais, les calcaires à *Hippurites* du Sénonien et du Turonien de l'Aude, des Bouches-du-Rhône, des Charentes, de la Dordogne, de la Catalogne, etc., les bancs d'*Ostrea deltoïdea* et d'*O. virgula*, d'*O. dilatata* et d'*O. acuminata* des divers niveaux jurassiques, etc., etc.

Par malheur, ces cas sont non seulement peu nombreux, mais relatifs seulement à des accidents très peu étendus, de façon que, bien qu'il s'agisse cette fois d'une ligne dont la direction soit discernable, elle n'est pas beaucoup plus longue qu'un point et laisse le problème général dans la même indétermination.

Il faut donc, jusqu'à nouvel ordre, se borner en fait de paléogéographie à indiquer sur la carte par des teintes aux contours très indécis les zones où les caractères littoral ou thalassique auront été certainement reconnus en sous-entendant que la limite de ces zones, soit l'une vis-à-vis de l'autre, soit pour la première vis-à-vis du continent, ne saurait être indiquée, même approximativement.

D'ailleurs, pour l'ordinaire, la dénudation subie par une partie des sédiments qu'on étudie a fait disparaître une partie plus ou moins grande et quelquefois très grande de la surface qu'il faudrait retrouver et en a modifié très profondément les contours.

Élie de Beaumont a magistralement déclaré dans ses célèbres *Leçons de géologie pratique* que l'époque actuelle est l'ère des deltas ; que par conséquent les âges antérieurs n'ont pas connu le phénomène qui leur donne naissance. Cette assertion, comme toutes celles qui tendent de

même à singulariser la période moderne, a reçu le démenti le plus complet.

On connaît maintenant des deltas d'âge très divers et ceux qui sont le plus déterminables constituent des gîtes d'exploitation profitable comme combustibles fossiles. C'est par l'étude des conditions de structure du bassin de Commeny que M. Henri Fayol est arrivé à reconnaître avec certitude le premier delta fossile qui ait été complètement décrit. Sans nous arrêter au détail de localités bien connues, il convient cependant de rappeler en quelques mots comment les choses se présentent dans cette localité désormais classique.

Pour qui se trouve sans préparation en face de la magnifique tranchée de Saint-Edmond, le terrain houiller comprend sur la paroi verticale exposée au regard une épaisse couche de houille recouverte successivement d'une assise de schistes, puis de grès noir et enfin de poudingues dont les galets peuvent dépasser le volume de la tête. Mais un examen plus attentif fait voir que la structure du sol est en réalité tout autre, — on pourrait dire opposée. Au lieu d'être constitué par la superposition de quatre éléments épais et sensiblement horizontaux, formé chacun d'une substance spéciale, il résulte de l'empilement, en nombre prodigieux, de petits éléments très minces et obliques et composés chacun de la même manière, de quatre segments successifs ayant les quatre compositions indiquées. Chacun de ces éléments est le produit du triage réalisé par la résistance de l'eau océanique à l'égard du courant fluvial chargé des matériaux mélangés : le tout se déposant sur le fond oblique du delta déjà commencé, comprend d'abord les galets qui tombent les premiers et se trouvent en conséquence au haut de la pente sous-marine, puis des sables qui se cimenteront en grès, puis des argiles qui deviendront des schistes, enfin des débris végétaux qui se précipitent les derniers, et comme à regret, et qui se transformeront en houille.

L'expérience a confirmé et éclairé toute cette mécanique spéciale et désormais le delta doit compter parmi les faciès dont l'étude du sol nous fournit la révélation à toutes les époques. Évidemment le delta interviendra de la façon la plus décisive dans les essais de paléogéographie.

Il en sera de même des estuaires et surtout des lagunes. Celles-ci se signalent d'ordinaire par des caractères auxquels on ne saurait se tromper, et, avant tout, par la présence de certains minéraux caractéristiques au premier rang desquels figurent le sel gemme et le gypse.

Malgré son manque de précision, la reconnaissance des faciès nous procure la notion capitale du déplacement incessant des bassins océaniques. C'est un fait déjà établi par l'étude du phénomène cortical, mais la vérification fournie en ce moment n'est pas inutile, loin de là, à l'établissement de l'une des bases les plus importantes de toute la géologie générale.

Le faciès lagunaire, par sa persistance depuis l'époque silurienne, où il a laissé à *Salina* (États-Unis) des vestiges évidents, témoigne mieux que n'importe quelle autre circonstance de la stabilité chimique de la mer au travers des temps géologiques. Aussi paraît-il indiqué à son propos de protester contre des suppositions bien des fois répétées au sujet de particularités de composition que l'océan aurait présentées à tels ou tels moments de l'évolution terrestre d'où l'on date des dépôts de substances remarquables.

C'est ainsi, par exemple, que des théoriciens ont défendu cette thèse qu'à l'époque du gault la mer devait être spécialement riche en acide phosphorique et que c'est la cause de l'accumulation qu'on y trouve de phosphate de chaux.

L'étude de la singulière formation des schistes cuivreux du Mansfeld a paru indiquer une composition tout à fait anormale de la mer, au fond de laquelle ces roches se sont déposées.

Pour expliquer l'abondance des minerais de fer à cer-

tains niveaux jurassiques, comme dans le terrain toarcien, par exemple, on a eu quelquefois recours à la supposition de sources ferrugineuses venant déboucher dans la mer où elles déversaient leurs produits.

Les anciens dépôts se signalent par une rareté relative en calcaire ; mais avant d'en faire la conséquence d'une composition spéciale de l'océan générateur, il importe de rechercher si des causes toutes différentes n'ont pas modifié au cours des temps des édifices stratigraphiques, qui d'abord pouvaient ressembler bien davantage aux dépôts d'aujourd'hui. Le calcaire est précisément parmi les substances que les eaux souterraines peuvent le plus aisément déplacer, et quoiqu'il leur faille, pour arriver à ce résultat, la collaboration de corps étrangers comme l'acide carbonique ou des sels métalliques, cependant, à la faveur d'une durée suffisante, l'extraction du calcaire a dû se réaliser dans une infinité de points.

De proche en proche, en suivant cet ordre de considérations, on en arrive à tenter la conception des océans primitifs où prirent naissance les plus anciens sédiments. Mais on en est réduit à leur sujet à des conjectures bien difficilement vérifiables, et la prudence exige qu'on soit très sobre de détails à ce sujet.

Dans tous les cas, ce qui précède suffit pour qu'on se fasse une idée du parti que la théorie pourra tirer des faciès dans l'histoire des masses sédimentaires. On voit dans quelle limite il est légitime de comparer les formations géologiques aux dépôts qui se constituent actuellement et qui sont loin d'être dès maintenant connus dans tous leurs détails. Aussi est-il juste de rechercher à qui on est redevable de ce point de vue fécond.

Gressly, l'auteur de l'expression de faciès, dans son ouvrage sur *Le Jura Soleurois*, a annoncé une « relation constante » entre la nature de chaque roche et les débris de corps organisés qu'elle contient : « C'est là où les caractères géognostiques des faciès sont le mieux développés

que les ensembles paléontologiques se prononcent le mieux. »

Toutefois, c'est Constant Prévost qui doit être regardé comme le père de la doctrine qu'il désigne sous le nom de *Principe du synchronisme des formations*.

Dans son mémoire, lu le 18 décembre 1837 à la Société géologique, il proclame qu'« à chaque période doivent correspondre synchroniquement des dépôts pélagiens, littoraux, fluvio-marins, fluviatiles, terrestres. » « Il est donc naturel, ajoute-t-il, qu'un dépôt calcaire manque en certains points et y soit remplacé par des dépôts argileux ou sableux. »

Pour comprendre l'importance de cette théorie, il faut se rappeler qu'en 1837 on admettait que deux roches identiques sont nécessairement de même âge, tandis que des roches différentes sont nécessairement d'âges différents. Par exemple le calcaire à Astéries de Bordeaux était regardé comme synchronique du calcaire grossier de Paris : l'argile oligocène de Belgique comme synchronique de l'argile de Londres, etc.

D'un autre côté, bien que Gressly ait fait ressortir les avantages que l'étude des faciès entraîne avec elle, la théorie de Constant Prévost se signale immédiatement par son ampleur : elle s'attaque à la surface entière de la Terre, au lieu de se cantonner dans une région très limitée comme est le Jura de Soleure.

Constant Prévost était d'avis, non seulement qu'il ne faut pas dénommer un terrain d'après un caractère pétrographique, comme la présence du grès vert ou de la craie blanche, mais même que les caractères paléontologiques ne sont pas immuables : là où se dépose du calcaire, vivent de certaines espèces et d'autres là où s'accumulent des sables, etc.

« Des espèces analogues, dit-il, doivent se rencontrer dans des formations analogues, même si elles datent d'époques différentes. »

Le triomphe de la doctrine du synchronisme des formations — de la doctrine des faciès, comme nous dirons à la suite de Gressly — n'a été obtenu que peu à peu, grâce à la persévérance de Constant Prévost. C'est là un incident de la lutte entre la théorie des causes actuelles et le point de vue cataclysmien.

C'est seulement en 1868 que Pictet admit les faciès dans ses *Matériaux pour la Paléontologie suisse*, 4^e série, 11^e livraison, p. 106.

L'une des conséquences les plus séduisantes de l'étude des faciès, c'est l'application qu'on semble en droit d'en faire à la reconstitution des contours géographiques aux différentes époques géologiques.

On a, dans cette direction, à mentionner une série d'observations auxquelles on ne saurait contester beaucoup d'intérêt. Par exemple, depuis le dévonien, la surface continentale en France va sensiblement en s'étendant. Il y a cependant des vicissitudes. Les continents se morcellent, puis se reconstituent. Le rapetissement de la mer est manifeste du dévonien ou triasique. A partir du lias, l'accroissement de la terre ferme est continu : mais il faut passer sous silence une foule d'incidents qui compliqueraient beaucoup cette histoire.

Malgré la précision moins grande encore qu'il faut prévoir, il y aurait intérêt à passer de ce fait spécial à la France à la considération de la Terre entière, et c'est ce que des théoriciens ont tenté.

Ainsi que M. Suess y a insisté dans son *Antlitz der Erde*, la fin du silurien montre une émergence qui s'étend de l'Illinois au Dniester, où se sont formés les dépôts continentaux du vieux grès rouge. Le dévonien moyen manifeste ensuite une transgressivité depuis les provinces baltiques jusqu'au Mackensie. Puis, la grande transgression du carbonifère se constate jusqu'en Californie, au Spitzberg, en Chine, et conduit à la série des alternatives permienues. A partir du permien, les mers en Europe

manifestent une tendance à empiéter toujours sur les continents. La transgression aux temps jurassiques moyens affecte l'Europe jusqu'en Écosse et aux rives de la Petchora, elle atteint l'Abyssinie, les bouches de l'Indus et la côte occidentale d'Australie.

A la suite d'un travail synthétique, MM. Diener, de Mojsisovics et Woogen ont reconnu que, déjà à l'époque triasique, il y avait un vaste océan à la place du Pacifique actuel, mais en dépassant les rivages de façon à baigner l'Australie, le Pérou, la Californie, le Japon. Ils ont retrouvé en outre les traces de deux grandes branches que cet antique océan étendait, l'une à travers toute l'Asie centrale et les Alpes jusqu'à la Méditerranée occidentale, l'autre à travers la Sibérie orientale jusqu'au Spitzberg. Pour ces géologues, comme pour M. Ed. Suess¹, la formation de ces océans, essentiellement différente de celle des montagnes plissées est due à de vastes affaissements successifs.

Le crétacé inférieur se signale en Europe par un rétrécissement de la mer, au cours duquel, dans le nord-ouest, se font les dépôts du Weald. Mais bientôt se déclare l'étonnante transgressivité de la craie, de la Patagonie au cercle polaire arctique, du Sahara au Tian-Chan, sur la côte de l'Atlantique, et sur celle du golfe de Bengale. On voit la craie, dans ces vastes régions, sur les terrains antérieurs les plus divers.

La fin des temps secondaires se signale d'ailleurs par un mouvement, en sens inverse, de très grande extension.

Enfin, l'ère tertiaire présente des phénomènes compliqués dont le détail nous entraînerait trop loin.

Cette description rapide montre, avant tout, la remarquable uniformité générale de la marche suivie par les déplacements de la mer à la surface de nos continents.

Uniformité d'accord avec la conformité des séries

1. *Comptes-Rendus de l'Académie des sciences*, CXXI, p. 1115, 1895.

géologiques, même à travers d'énormes distances : les termes correspondants n'étant cependant pas rigoureusement synchroniques et pouvant être séparés par tout le temps pris par le déplacement horizontal de la mer.

Les applications de la doctrine des faciès ne se bornent pas exclusivement à l'établissement des restaurations paléogéographiques. On a prétendu lui faire jeter de la lumière sur l'économie même de la sédimentation et en retirer par conséquent les bases de la classification stratigraphique.

C'est ainsi que M. Van den Broeck, dans ses études pour la construction de la carte géologique de Belgique, a développé une hypothèse d'ailleurs non démontrée d'après laquelle la superposition des faciès se reproduirait d'une façon périodique dans toute l'épaisseur de la croûte terrestre, chaque période caractérisant un terrain.

6 — LA FONCTION GLACIAIRE PENDANT LES TEMPS GÉOLOGIQUES

Le glacier constitue un appareil encore plus fragile que le volcan et quand il est fondu, la disparition complète des traces qu'il a laissées sur le sol est un événement inévitable.

Supposons un moment un semblable glacier durant les temps jurassiques.

La région où il se trouvait s'est affaissée et la mer l'a envahie : la première action des flots a été sans aucun doute de démanteler les moraines et d'en laver les matériaux hétérogènes. Le frottement a fait perdre aux plus gros les traits morphologiques qui pourraient leur donner un caractère glaciaire et le balancement des eaux les a répartis rapidement en dépôts parfaitement classés, parfaitement distincts les uns des autres et n'ayant plus rien qui puisse les distinguer des sédiments ordinaires.

De leur côté, les surfaces moutonnées ou polies par les glaciers ont été rapidement attaquées, mécaniquement

ou chimiquement; les reliefs du sol ont changé de forme et rien n'est resté de l'ancien glacier, ce qui est bien différent de ce que nous avons vu relativement aux volcans qui peuvent persister par les lits de leurs cinérites et par d'autres détails facilement reconnaissables.

C'est là sans doute la raison principale qui nous démunait si complètement pour refaire l'histoire, aux anciennes périodes, de la fonction glaciaire. Et l'on ne doit pas se

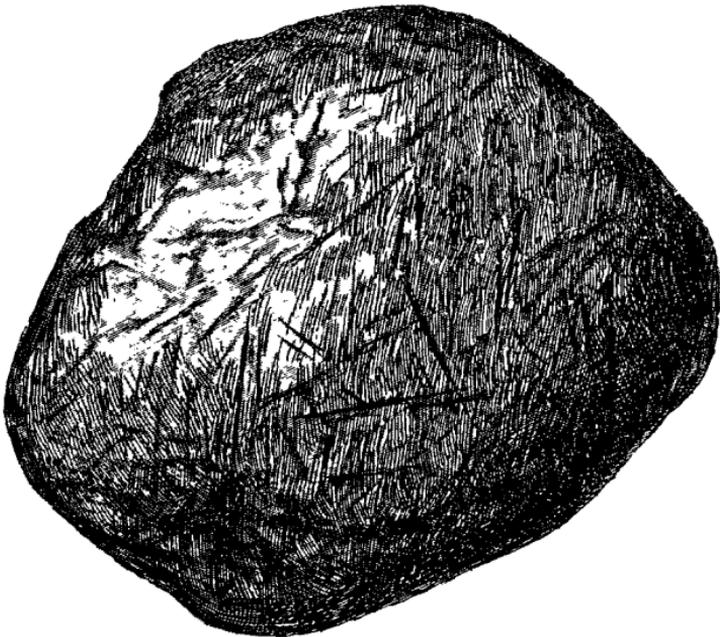


Fig. 37 — Galet strié du conglomérat de Dwyka (Afrique du Sud).

laisser aller à croire glaciaires des formations d'âge divers, parce qu'on y rencontre des galets striés. Ceux-ci, comme on en rencontre par exemple dans des couches miocènes dépendant du *Nagelfluhe* de la Suisse et par exemple à Heiden (Appenzell) où j'en ai recueilli moi-même, doivent leurs stries à l'exercice de la dénudation souterraine, de même qu'ils lui doivent les accidents de surface qui en font fréquemment des galets impressionnés. Certainement, la même explication s'applique aux galets striés

qu'on trouve dans le conglomérat carbonifère de Dwyka, Afrique Australe, et que M. Dunn n'avait pas craint de regarder comme glaciaires (1). M. le D^r Stapff a publié en 1889 dans le *Naturwissenschaftlichen Wochenschrift* de Berlin, une gravure que nous reproduisons (fig. 37) du présent ouvrage, représentant un de ces galets, et montré spirituellement l'in vraisemblance de la découverte : « Man möchte, dit-il, an die chinesische Delikatesse « Eis in brennender Sauce » denken, wenn von einer Glazialformation des Kaplandes die Rede ist, Zumal von einer der Karbonzeit angehörigen. » Et il conclut que le conglomérat n'est aucunement glaciaire, malgré les stries, dont il n'explique d'ailleurs pas la présence.

Pour ma part, je n'ai aucun doute sur la légitimité de cette conclusion en ce qui concerne l'origine des stries observées, mais il est utile de faire remarquer qu'il n'y a pas d'impossibilité *a priori* à l'existence de glaciers à l'époque houillère. Nous connaissons en effet des glaciers sous les climats tropicaux et on a souvent cité la Nouvelle Zélande où des moraines sont poussées jusque sous les ombrages de fougères arborescentes.

Les glaciers ont pu se produire dès que des phénomènes orogéniques ont amené dans l'atmosphère des sommets rocheux suffisamment élevés et il est possible que les cimes du ridement archéen aient eu leur glacier à l'époque primaire. Mais, je le répète si la chose est possible, rien, absolument rien, ne la démontre et par conséquent nous n'avons aucunement le droit de la faire entrer en ligne de compte dans nos raisonnements.

Remarquons que, quelle qu'en ait été l'époque, la première apparition des glaciers a amené une perturbation sans précédent dans le régime de la circulation atmosphérique des eaux. Dès qu'un sommet a été poussé à une

1. Carte géologique de la colonie du Cap, 1886.

altitude suffisante, il a déterminé la condensation de la neige sous des latitudes où celle-ci n'avait jamais paru et, par suite, l'emmagasinement à haute altitude d'une nappe d'eau qui se serait écoulée liquide presque instantanément. Édouard Collomb a écrit une page intéressante sur la première apparition de la glace, qu'il considère d'ailleurs comme un phénomène très récent.

Mais si nous sommes peu renseignés sur l'âge d'apparition des glaciers, il semble que nous soyons beaucoup moins dépourvus en ce qui concerne les causes de leur disparition dans divers massifs montagneux où ils ont laissé des traces non équivoques de leur ancienne existence.

Tout le monde sait comment, depuis 1838, à la suite des travaux de Le Blanc et Renoir, puis de ceux d'Édouard Collomb, de Dollfus-Ausset, de Hogard et d'autres géologues, l'ancienne existence dans les Vosges de glaciers, maintenant tout à fait fondus, a été rigoureusement démontrée.

Mais si ce résultat considérable est actuellement admis, son acceptation soulève une nouvelle question d'un intérêt tout aussi direct et qui ne peut laisser personne indifférent : pourquoi et comment ces glaciers ont-ils disparu ?

La réponse paraît devoir résulter surtout de l'observation convenablement conduite des glaciers actuels. Or, si, par la pensée, on se transporte soit à Grindelwald, soit à la Mer-de-Glace, soit dans quelque autre localité analogue, on reconnaît que le glacier est loin de recouvrir toute la surface du sol, qui mérite d'être qualifiée de « morainique » suivant l'expression proposée par Desor. En avant de lui et sur ses côtés, il existe une large zone où les roches sont moutonnées, polies et striées et où se montrent des blocs, des galets et des boues tout pareils aux matériaux charriés par la glace.

La première idée, généralement adoptée, et qui résulte

de ce spectacle, c'est que les glaciers d'aujourd'hui ne sont qu'un résidu de glaciers plus anciens qui étaient bien plus grands. Avec un peu plus de réflexion, on arrive à reconnaître que la question n'est pas si simple qu'on avait cru, et que cette interprétation fait surgir bien des difficultés.

On s'imagine le poids d'une masse de glace remplissant toute une vallée et, dès lors, on comprend aisément les contre-coups que son lent déplacement, suivant la déclivité du sol, doit avoir sur la forme des roches soumises à une si colossale friction. Il est vrai que la glace est bien peu dure pour s'attaquer efficacement au granit et aux autres matières pierreuses qui font l'ossature de la montagne, mais on reconnaît sans peine que le glacier écrase sous sa masse, comme un lit de particules minérales, galets, grains sableux, poussières plus ou moins fines qui, par leur dureté, mordent activement sur le roc sous-jacent et le creusent peu à peu.

Aussi le glacier, avec ce cortège de particules résistantes qu'il pousse sous lui, peut très exactement être comparé, comme nous l'avons déjà fait pour les cours d'eau, au fil enduit d'émeri que les lapidaires emploient pour scier les gemmes les plus dures, et on peut prévoir que le glacier ne coulera pas très longtemps dans sa vallée sans pénétrer verticalement dans le sol d'une manière sensible : l'efficacité de son travail est démontrée, sans qu'il soit nécessaire d'autres preuves, par la nature absolument boueuse des eaux qui sortent de son front et qui surprennent bien les poètes disposés d'avance à voir la glace limpide donner par sa fusion des ondes cristallines. Qu'ils aillent voir l'Arveyron en avant de la Mer-de-Glace, le Rhône dès son origine et jusqu'à Villeneuve, ou la Lutschine sous le glacier de Grindelwald, puisque c'est celui-ci que nous avons choisi pour exemple !

Mais si le glacier entre dans le sol, il faut de toute

nécessité qu'il cesse d'atteindre par le haut son niveau primitif, et dès lors il doit abandonner, à droite et à gauche de ses rives, des marges de roches qu'il a précédemment frictionnées plus ou moins et qui portent comme le sceau de sa présence et la marque de sa fabrique.

Il y a bien longtemps que ces marges ont frappé les observateurs. Croirait-on cependant que ce n'est aucunement à la constatation des faits d'observation qu'on s'est arrêté pour interpréter la disposition de la zone moutonnée par rapport à la glace? On a préféré, en général, refuser toute activité dénudatrice sérieusement efficace au fleuve solide et admettre qu'il a, au cours des temps, perdu de sa profondeur; qu'il était jadis aussi épais qu'il le serait si on lui ajoutait, en glace, l'épaisseur des roches moutonnées. Cela paraît bien mal raisonné, c'est cependant la doctrine encore défendue par des auteurs qui seraient fort étonnés de n'être pas considérés universellement comme des géologues sérieux.

On pourrait penser que ces naturalistes n'ont jamais été regarder la nature de façon à la bien voir, c'est-à-dire autrement qu'à la lumière, parfois si utile, mais souvent si dangereuse, des idées préconçues; sans cela, comment n'auraient-ils pas constaté que le poli des roches moutonnées, qui n'est lui-même que très provisoire et destiné à disparaître sous l'influence de l'intempérisme, est beaucoup plus compromis dans ses parties hautes que dans ses régions inférieures, de telle sorte que sa limite d'en haut est certainement fort au-dessous de la zone qu'elle a intéressée à une certaine époque? Il suffit d'examiner les choses au-dessus de la Mer-de-Glace, au Chapeau et surtout aux Ponts, pour être complètement édifié à cet égard.

A Grindelwald, tous ces faits se vérifient aisément, et l'on constate aussi qu'en avant du glacier existe une large bande de terrain moutonnée dans toute la largeur de la vallée, limitée en avant par une moraine toute pareille à

celle que le glacier édifie en ce moment, et la conclusion, c'est que le glacier a reculé progressivement. On va voir la fécondité de cette remarque pour l'interprétation des Vosges que nous pouvons prendre comme excellent exemple.

Il se trouve, en effet, que, dans ces vallées vosgiennes où nous avons reconnu tout à l'heure le « paysage morainique » dans toute sa netteté, on rencontre fréquemment non pas une moraine terminale lancée en croissant d'un flanc à un autre, mais plusieurs moraines placées les unes derrière les autres et espacées, suivant les cas, fort inégalement.

Ainsi, dans la vallée de Saint-Amarin, nous trouvons à Wesserling une énorme moraine frontale *triple*, qui barre la vallée dans un sens transversal, puis dans la même vallée, à 5 kilomètres en amont, à Krüth, une nouvelle moraine frontale disposée dans le même sens.

De même, dans la vallée de Massevaux, nous voyons un premier degré de l'échelle au village de Kirchberg, et, sur ce point, la moraine s'étend tout au travers d'un bord à l'autre de la vallée. Un second degré est situé au village de Dolleren, à 3 kilomètres en amont.

Dans la vallée de Giromagny, même échelonnement des moraines : moraine frontale à Giromagny, et second échelon à quelques kilomètres en amont.

Enfin, pour borner nos exemples, la vallée du Chajoux, au-dessus du joli village de la Bresse, nous offre la coexistence de plusieurs moraines placées les unes derrière les autres.

Les personnes qui pensent que les roches moutonnées supérieures datent d'un temps où le glacier était plus épais, n'hésitent naturellement pas à dire que les moraines antérieures se rapportent à un moment où le glacier était plus long qu'aujourd'hui. On vient de voir que ces personnes n'ont pas nécessairement raison dans le premier cas ; en est-il de même dans le second ?

A première vue, on sera d'accord avec elles et on dira, comme elles, que le glacier s'est restreint à travers les âges, parce que les conditions météorologiques de la région se sont adoucies.

Je crois pouvoir faire sentir tout de suite que cette explication, qui semble simple et évidente, est au contraire extrêmement compliquée et contredite par les faits. Il me faut réclamer un peu d'attention pour le démontrer, mais je me flatte que la chose n'ira pas sans la mise en lumière de quelques faits de nature à intéresser tout le monde.

Quand on fait de la géologie, c'est-à-dire quand on cherche à reconstituer, par la pensée, les périodes par lesquelles la terre a passé pour présenter les caractères qu'elle nous offre aujourd'hui (sans préjudice de ceux qu'elle acquerra plus tard), on est véritablement émerveillé du spectacle qui nous est offert par une évolution continue.

Par exemple, l'étude des plantes et des animaux fossiles qui se sont succédé sur notre globe montre que la température moyenne de chaque lieu a été progressivement en s'abaissant et que c'est peu à peu que les climats se sont déclarés et se sont accentués. Pour ce qui est de la région française qui nous intéresse spécialement, on reconnaît, d'après les fossiles, et malgré quelques oscillations très faibles, que la température moyenne était plus élevée durant les temps secondaires que pendant les temps tertiaires et plus élevée pendant les temps tertiaires, à la fin desquels la Bourgogne, par exemple, était couverte de forêts de grenadiers et de lauriers des Canaries, qu'à l'époque actuelle. Cette constatation est d'ailleurs de haute valeur pour les conséquences qu'elle comporte sur la physiologie tout entière du globe terrestre.

Or, si l'on admet que les glaciers de l'époque quaternaire ont été plus épais et plus longs que ceux de l'époque actuelle, et si l'on admet aussi, comme nous l'annoncions au début, qu'il y a eu, dans ces temps quaternaires, des glaciers bien plus nombreux qu'aujourd'hui, nous voilà

tout naturellement conduits à admettre aussi qu'il y a eu dans ce temps-là une température moyenne notablement inférieure à celle dont nous jouissons maintenant. Voilà notre évolution thermométrique compromise et l'histoire générale de la surface terrestre interrompue par un incident imprévu. Il faut, pour rendre compte de cet incident, supposer que les conditions générales ont été brusquement changées sur la terre, qu'il y a eu un refroidissement qui a intéressé à la fois des surfaces immenses, et on n'a pas reculé devant l'hypothèse d'une diminution du soleil et d'autres suppositions semblables. On voit que l'explication des traces glaciaires comprises ainsi est incontestablement compliquée, et non pas simple, comme il semblait à première vue.

Bien entendu, ce ne serait pas une raison pour refuser de l'accepter si elle était démontrée par les faits, mais c'est tout le contraire qui arrive ; et si l'on examine les témoignages de la paléontologie, on trouve que la température moyenne devait être plus élevée en France pendant les temps quaternaires qu'elle ne l'est aujourd'hui. On a, par exemple, la preuve qu'il y avait à Moret, en Seine-et-Marne, des figuiers qui prospéraient, tandis qu'à présent on doit, pour les faire venir à bien, les planter dans des points abrités, encoignures, etc., et encore gèlent-ils de temps en temps. On a aussi trouvé dans certains lits du diluvium des petites coquilles appelées *Corbicules*, dont les analogues ne vivent à présent que dans les rivières chaudes et pas du tout dans nos cours d'eau de la France du Nord.

Mais alors, comment expliquer qu'un glacier ait reculé ses moraines comme vient de faire le glacier de Grindelwald et comme ont fait beaucoup d'autres glaciers, à commencer par ceux des Vosges, sans accepter du même coup qu'ils aient diminué dans leurs dimensions ? Cela paraît tout à fait possible, sans rien faire intervenir qui altère la marche de l'évolution géographique.

Un glacier ne peut subsister que s'il est alimenté. Il constitue en somme un organe par lequel la montagne se décharge sous la forme compacte de l'eau qu'elle a reçue à son sommet sous la forme neigeuse ; et tout naturellement le volume du glacier est en rapport avec l'abondance d'alimentation des cirques supérieurs d'où il descend. Toutes les variations de cette alimentation doivent se traduire par des variations dans le volume du glacier, et c'est ce qui explique les oscillations de ces fleuves solides qui, d'années en années, sont plus ou moins longs, avancent ou reculent dans telle vallée, pendant que, dans quelque vallée voisine, ils peuvent avoir une allure différente.

Mais, à côté de ces vicissitudes quelque peu irrégulières et qui peuvent se compenser plus ou moins complètement au cours des années, il y a dans l'économie des glaciers quelque chose qui doit nécessairement faire baisser progressivement le débit des vallées inférieures : c'est que les montagnes perdant, incessamment et sans compensation, de leur substance, qui s'en va sous la forme multiple de boue, de sable, de gravier, de gros blocs, abaissent en même temps l'altitude de leurs sommets. Or, c'est cette altitude qui était la cause même de la précipitation de la neige, c'est-à-dire la raison d'être des glaciers ; sa diminution doit amener une diminution correspondante dans cette précipitation elle-même et dans le glacier qui en résulte.

Or, sans qu'il y paraisse tout d'abord, voici une remarque qui va jeter beaucoup de clarté sur l'histoire des glaciers des Vosges. Un glacier considéré à part doit se raccourcir et se diminuer par le seul fait qu'il existe, et il lui faut se construire les unes après les autres des moraines de moins en moins éloignées de son origine alimentaire (fig. 38).

A ce point de vue, une comparaison tout à fait intéressante s'impose entre les glaciers des Alpes et ceux des

Pyénées. On voit, d'après les vieilles moraines de ces derniers, qu'ils ont eu dans le passé des dimensions et surtout des formes tout à fait identiques à ceux des premiers. Ils en diffèrent toutefois aujourd'hui, étant réduits à la partie large et supérieure et n'ayant plus sous leur *cirque d'alimentation*, la longue traînée serpentine caractéristique des glaciers alpins. Et l'on peut en conclure, d'abord, que si les glaciers des Alpes avaient à subir une diminution dans leurs neiges originaires, ils prendraient nécessairement les caractères des glaciers pyrénéens : d'où il n'est pas très difficile de conclure que ceux-ci ont eu dans le passé la forme des glaciers alpestres et qu'ils l'ont perdue en vieillissant.

En effet, par la seule raison de leur existence et de leur durée, ces glaciers ont usé la montagne qui les supporte et ils ont charrié activement vers les régions basses des alentours tous les fragments détachés des rochers par les intempéries. La hau-

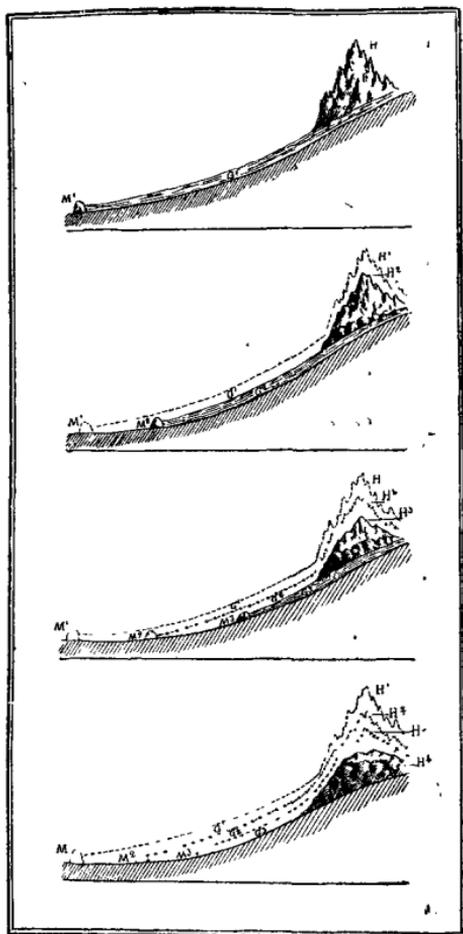


FIG. 38. — Schema destiné à montrer comment par le fait seul de son activité un glacier substitue au bout d'un temps convenable le régime vosgien au régime alpestre primitif $H_1H_2H_3H_4$, hauteur de la montagne à divers moments successifs $M_1M_2M_3$, moraines édifiées successivement par les glaciers $G_1G_2G_3$.

teur de la montagne, en même temps que sa surface, en a été diminuée, et alors, conformément à ce que nous venons de dire, le glacier s'est rapetissé peu à peu.

A cet égard, on peut retourner le raisonnement et en confirmer ainsi l'exactitude. Qu'on s'imagine, en effet, ce que deviendrait la chaîne des Pyrénées remise en possession de la gigantesque masse des matériaux qui lui ont été soustraits depuis le temps où ses glaciers poussaient leurs moraines jusque dans la plaine. Il faut se rappeler qu'on n'a qu'une idée fort incomplète du cube dont il s'agit par la vuè des moraines, des blocs erratiques, des éboulis de tous genres qui recouvrent les pentes et encombrant les vallées ; le plus grand volume a été emportée par les eaux sauvages, par les ruisseaux, par les torrents et par les rivières, et aussi, pour une part énorme, sous forme de poussières, par les vents. Évidemment, une pareille addition de substance sur les reliefs actuels porterait les sommets de la chaîne à une altitude très supérieure à celle d'aujourd'hui et, dès lors, on y verrait s'augmenter la neige et conséquemment la glace ; on y verrait les glaciers pousser leurs traînées jusque dans les plaines maintenant envahies par la végétation. En un mot, on aurait refait avec les Pyrénées une nouvelle édition des Alpes, n'en différant qu'en raison de la distance, d'ailleurs très faible, des deux régions en latitude.

Ce rapprochement prend toute sa signification quand on se rappelle que les Pyrénées sont des montagnes de surrection plus ancienne que les Alpes, car on en doit conclure que le phénomène y est plus ancien. On en conclut aussi qu'avec le temps les Alpes se réduiront progressivement à l'état de Pyrénées, en ce sens que, soumises au rabotage glaciaire et à la démolition par les agents atmosphériques, elles s'abaissent peu à peu, deviennent de moins en moins aptes à se constituer de grands appa-

reils de condensation aqueuse et, par conséquent, ne peuvent plus nourrir que des glaciers à chaque instant moins grands que les glaciers précédents. La longue traînée des mers de glace devra se raccourcir et, dès lors, laisser en avant de son front la moraine antérieurement édifiée, et le recul aura une allure qui sera le reflet exact des incidents mêmes de la démolition des sommets. Si cette démolition est de marche continue, le recul sera continu lui-même, et, derrière la moraine abandonnée, le glacier éparpillera seulement des matériaux erratiques. Mais si les agents de démolition rencontrent dans les hauteurs des points de démantèlement plus laborieux et plus lents, comme des roches plus dures, plus cohérentes que les précédentes, alors le glacier conservera pour un temps la longueur qu'il aura acquise, et il pourra édifier une nouvelle moraine tout à fait comparable à la première. Puis le recul recommencera, et ainsi de suite.

Il pourra d'ailleurs se présenter, au cours de cette histoire, des incidents variés, et l'un d'eux mérite d'être cité, parce que sa fausse interprétation a conduit à imaginer un vrai roman sur la météorologie des temps quaternaires. Le recul du front du glacier est, comme on vient de le voir, en rapport avant tout avec le recul de son bassin d'alimentation ; de sorte que ce recul peut, à la rigueur, se faire sans que le glacier change de longueur absolue. C'est ce qui le distinguera des rivières qui remontent aussi peu à peu à leur source, par le phénomène dit de « régression », mais qui ne peuvent changer pour cela la place de leur embouchure, et par conséquent s'allongent avec le temps.

Mais s'il y a une différence à ce point de vue entre le cours d'eau liquide et les cours d'eau congelés, il reste des uns aux autres, ce trait commun, que la régression de la source amène dans les deux cas la disparition de certains reliefs de partage entre deux bassins hydrographiques voisins. Quand la chose a lieu pour les rivières, on dit qu'il

y a *capture* de l'une par l'autre, mais on n'a pas assez songé que quand elle se produit pour les glaciers, elle amène, ou peut amener, une complication nouvelle dans leur travail géologique.

En effet, un glacier reculant peu à peu, comme on vient de le voir, parce qu'il est de moins en moins *nourri*, peut, à la faveur de la disparition d'une crête mitoyenne



FIG 39 — Carte des glaciers du Brouillard et du Fresnay montrant dans leurs parties hautes l'existence d'une cloison mitoyenne de roches très minces et qui sous l'action de l'intempérisme ne manquera pas de disparaître bientôt

qui le séparerait d'un glacier voisin (fig. 39), établir sa communication avec lui et en recevoir tout à coup une contribution alimentaire plus ou moins considérable. Le voilà, (fig. 40) dès lors, en mesure de reprendre en tout ou en partie ses anciennes dimensions ; il se gonfle, il s'allonge, et alors il écrase sa moraine frontale, passe par-dessus (ce qui en fait une *moraine profonde*) et peut aller rejoindre des moraines laissées à une époque précédente (fig. 41).

Évidemment, de semblables incidents ont dû se pro-

duire dans toutes les vallées des grands massifs montagneux, et ils ont laissé des traces qui, pendant bien longtemps, ont été interprétées de la manière la plus inexacte par la supposition de deux époques successives de grand froid, pendant chacune desquelles les glaciers avaient eu une très large extension et qui auraient été séparées l'une de l'autre par des temps de climatologie beaucoup plus clémente (fig. 42).



FIG. 40 — Carte des glaciers de Planerousse et de Treutz-Bouc, montrant comment ce dernier a réalisé la capture d'une portion du premier par la destruction d'une cloison rocheuse qui l'en séparait tout d'abord.

Les modifications du relief du sol sous l'influence du rabotage glaciaire et de la démolition des roches par les agents météoriques ont, à maintes reprises aussi, changé l'itinéraire de certains glaciers. C'est ainsi que des vallées relativement basses où prospérait la végétation ont pu se transformer en lits de glacier. D'après Grüner, par exemple, il serait constaté par des actes que la vallée du Lauter Aar était anciennement fertile et se nommait alors *Blümilsalp*, c'est-à-dire vallée des fleurs. Nous ne faisons pas de

difficulté pour admettre la possibilité d'une semblable transformation.

Quand j'ai émis pour la première fois la théorie de la capture des glaciers elle a été l'objet de critiques extrêmement vives et on l'a qualifiée très sévèrement. Depuis lors, la réalité de ce phénomène a été directement

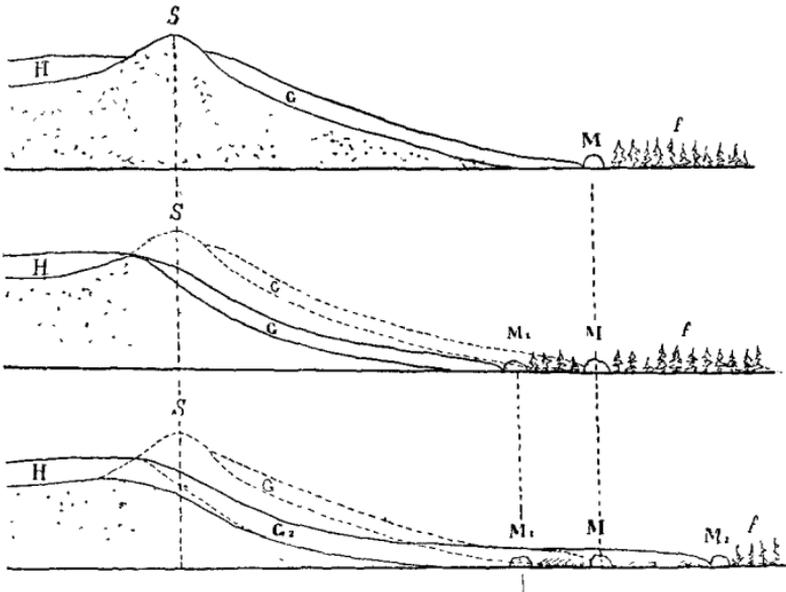


FIG 41 — Schéma montrant les phases successives de la capture des glaciers G, glacier d'abord séparé du glacier H par le relief rocheux S. Le retrait du glacier H consécutif à l'abaissement du sol le conduit à édifier la moraine M_1 derrière la moraine M. Mais la contribution de glace venant de H à la suite de la capture lui rend son volume grâce auquel il reporte sa moraine en M_2 .

constatée sur le terrain et par exemple par sir Martin Conway.

Et maintenant, nous n'avons plus qu'à appliquer les notions que nous venons d'acquérir à l'histoire ancienne du massif des Vosges pour comprendre toutes les apparences que cette belle région offre aux regards du touriste. Il suffit, en effet, d'opérer à son égard comme nous le faisons tout à l'heure pour les Pyrénées, c'est-à-dire de remettre ses sommets, par la pensée, en possession de

toute la masse de matière que la dénudation glaciaire en a retirée.

Les innombrables moraines mentionnées, les placages de terrain glaciaire éparpillé, les éboulis et, par-dessus tout, le cube colossal de boue et de poussière emportées par les eaux courantes et par les vents représentent un volume comparable à celui du massif encore subsistant. En recouvrant celui-ci de la substance dont il s'agit, on en augmenterait à la fois le diamètre et la hauteur, laquelle ne saurait être beaucoup accrue sans que le régime glaciaire se rétablît du même coup sans autre cause. En

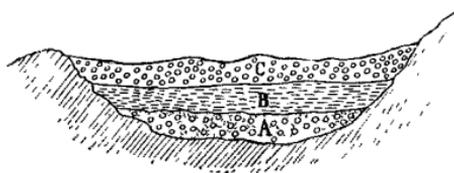


FIG 42 — Coupe montrant comment les glaciers de la fig précédente peuvent comprendre une formation lacustre B entre deux formations glaciaires A et C et reproduisant en même temps la disposition du sol observée à Durnten et dans d'autres localités voisines de Zurich où l'on a cru à tort reconnaître les traces de deux périodes glaciaires successives

quelques points de la chaîne, par exemple sur le Hohneck, c'est comme à regret que les derniers lambeaux de neige fondent au milieu du mois d'août : un peu plus, et ils attendraient les neiges de l'hiver suivant. Quelques centaines de mètres d'altitude en plus suffiraient pour restaurer le régime de la neige persistante, et les Vosges reprendraient un aspect qu'elles ont eu très longtemps et que les Pyrénées nous présentent encore.

Les vicissitudes glaciaires se rattachent donc, comme à leur cause nécessaire, à des modifications dans l'altitude du sol, et il faut convenir que quelques bons esprits l'ont supposé depuis longtemps :

« Qui empêche de supposer, dit Alcide d'Ortigny, que, lors de la période sub-apennine, le relief de la dislocation des Alpes s'est élevé à un *millier* de mètres plus haut qu'il

ne l'est aujourd'hui, en exhaussant encore, par suite de la même dislocation, la plus grande partie de la chaîne des Vosges ? L'ensemble des Alpes, par suite d'une élévation de 1 000 mètres de plus au-dessus des océans, aurait nécessairement eu des glaciers plus vastes, bien plus étendus ; les vallées des Vosges devaient aussi en être couvertes alors... » Seulement il ajoute : « Rien d'étonnant que les Alpes et les Vosges, après avoir été plus élevées qu'aujourd'hui, lors des oscillations du sol, ne se soient successivement affaissées, en même temps qu'une portion plus ou moins grande des contrées environnantes. Cet affaissement graduel serait tout à fait en rapport dans les Alpes et les Vosges avec le retrait également graduel des glaciers, retrouvé par les anciennes moraines observées entre les limites anciennes les plus éloignées et les limites actuelles de l'action des glaciers. »

Comme on le voit, le point de vue nouveau, et qui nous paraît être le vrai, consiste à attribuer la perte d'altitude déterminante de la disparition des glaces, non pas à un mouvement général d'affaissement éprouvé par l'écorce terrestre dans la région considérée, mais à l'usure du sol par l'action directe et indirecte des glaciers. C'est une forme très digne d'attention des idées d'évolution qui tendent de plus en plus à s'affirmer dans les différents chapitres de la géologie et qui conduisent à comparer la terre tout entière à un gigantesque organisme dans lequel suivent leur cours normal, les fonctions d'une véritable physiologie.

Chaque massif glaciaire a son histoire autonome. Le soulèvement d'une chaîne de montagnes le détermine et, une fois constitué, il se développe et il évolue indépendamment (dans le temps) des autres massifs analogues qui peuvent exister plus ou moins loin. Ce n'est pas le réchauffement général d'un pays à glaciers qui a fait disparaître ceux-ci ; c'est, au contraire, la disposition spontanée des glaciers qui a réchauffé le pays.

Les traces qu'ils laissent après leur disparition partielle

ou totale sont d'ailleurs les mêmes dans tous les cas, et il peut être très difficile de retrouver, en les comparant d'un massif à l'autre, si elles sont rigoureusement contemporaines. ou si, au contraire, elles ont été produites à des intervalles plus ou moins longs. Or, ce détail a une grande importance en nous procurant des conceptions essentiellement différentes de l'état de la surface terrestre. Si, en effet, toutes les traces glaciaires qu'on trouve dans les régions sub-alpines, comme dans les régions sous-pyrénéennes, dans le plateau Central, dans la presqu'île de Bretagne, comme dans les Vosges, comme bien ailleurs, si toutes ces traces sont rigoureusement du même moment, alors une grande partie de la surface de la France, de l'Europe et même de la terre a été couverte d'une calotte de glace plus ou moins continue, plus ou moins comparable à l'*Inlandsis* actuel du Groënland, qui en est comme une faible réduction. Mais, si chaque massif a eu son histoire distincte et si les conditions favorables à la genèse des glaciers se sont manifestées seulement à quelques dizaines de siècles ici ou là, alors les glaciers de Bretagne pouvaient avoir déjà fondu quand ceux des Vosges ont pris naissance ; ceux-ci pouvaient n'exister plus quand les Pyrénées avaient le caractère de nos Alpes d'aujourd'hui, et les Alpes pouvaient ne présenter leur plus grande extension glaciaire qu'après que les Pyrénées avaient déjà dépassé leur maximum. En d'autres termes, le grand froid pouvait être successivement localisé en différents centres, comme il l'est en ce moment dans les massifs du mont Blanc, de la Jungfrau et d'ailleurs, et, non loin de là, les conditions douces favorables à la vie des plantes et des animaux pouvaient se présenter.

Dans un cas, il faut, comme on l'a voulu, admettre une ou plusieurs périodes glaciaires ; dans l'autre, il n'y a pas à faire intervenir dans l'histoire de la terre un incident unique et qui vient rompre de la manière la plus imprévue la marche si manifeste de l'évolution superficielle.

Les conclusions, acceptées trop vite dans cette direction et qui sont favorables à l'extension universelle des glaces, proviennent avant tout de la confusion dans les durées. Il est clair que toutes les traces de glaciers fondus dans nos pays sont de la *même époque géologique*, — l'époque quaternaire, comme on dit, — mais cette époque a été si longue, que sa durée ne peut pas être évaluée avec la même mesure que les phénomènes historiques, de sorte que des faits synchroniques, géologiquement parlant, peuvent être prodigieusement distants les uns des autres, suivant la mesure humaine. On se trouve ramené à cette conclusion, quel que soit le chapitre des phénomènes dits *récents* que l'on étudie et qui, considérés par la science bégayante des débuts comme des manifestations plus ou moins décousues de puissances en conflit, se révèlent peu à peu comme les incidents successifs et nécessairement liés les uns aux autres d'un développement majestueux.

7 — LA FONCTION ATMOSPHÉRIQUE PENDANT LES TEMPS GÉOLOGIQUES

Nous avons des témoignages très variés de la persistance de la fonction atmosphérique, au travers de toute la durée des temps sédimentaires. Déjà dans les plus antiques assises nous rencontrons de ces « ripple marks » comme disent les Anglais où l'on peut voir comme des « vents fossiles » et qui consistent en rides sableuses maintenant consolidées en quartzites. Nous avons aussi, dans les bilobites et dans les vestiges analogues, des témoignages non moins certains de l'activité éolienne ainsi qu'il résulte d'études que j'ai résumées dans ma *Géologie expérimentale* et sur lesquelles il serait inutile de revenir ici.

On peut constater encore à ce sujet la tendance qu'ont eue certains géologues de restreindre beaucoup, pour les temps

géologiques, les effets si considérables à l'époque actuelle des phénomènes atmosphériques et c'est ainsi qu'Élie de Beaumont a prétendu qu'on ne saurait supposer des dunes fossiles. « L'époque actuelle est l'ère des dunes », dit-il, en même temps qu'il gratifie cette même période actuelle d'autres particularités exclusives.

Il y aurait lieu de répéter ici ce que nous disions pour les cratères volcaniques ; à savoir que la conservation des dunes à travers des périodes géologiques ne paraît guère vraisemblable. L'arrivée de la mer par suite de l'affaissement d'une région à dunes amènerait le nivellement des bourrelets sableux comme celui des cônes de lapilli. Cependant, quelques vestiges peuvent subsister par exceptions et la transition est procurée par la découverte en certains pays, comme les Landes de Gascogne, de systèmes de dunes orientées tout autrement que les dunes actuelles et témoignant de l'existence dans le passé d'un profil de côtes et d'un régime de vents tout différents des conditions actuelles.

Par comparaison avec les phénomènes actuels, on est porté à attribuer une origine éolienne à certains dépôts fins ayant avec le lœss des analogies de constitution et de gisement ; et la découverte, relativement récente, de tufs de projection volcanique de tous les temps, suppose la collaboration de l'océan gazeux, aux époques les plus diverses.

Parmi les phénomènes atmosphériques les plus dignes d'attention, il faut ranger comme éminemment propres à rétablir sous nos yeux les conditions passées de la surface terrestre, ceux qui concernent la distribution de la température externe, et par conséquent la première apparition et l'accentuation successive des climats. Ici, le guide dont nous disposons et qui se montre capable de nous renseigner excellemment, nous est procuré par l'examen des fossiles, et tout en laissant de côté, pour un peu plus loin, ce qui dans ce sujet est essentiellement biologique,

il nous faut, cependant, constater tout de suite que les animaux et les végétaux fossiles ont conservé des traits caractéristiques qui leur ont été procurés par les conditions de milieu dans lequel ils ont vécu.

Tout d'abord, on ne peut être que très frappé du contraste qui se présente entre la très grande variation des plantes actuelles avec la latitude, et l'uniformité botanique de toute la surface terrestre à de certains moments. Par exemple, les plantes miocènes de l'Alaska sont trop pareilles à celles du Mackensie, et celles-ci aux plantes d'Atanekerdluk (Groënland), pour ne pas dénoter l'existence d'un climat identique sur tous ces points supposés contemporains. Or leur latitude respective diffère d'une manière sensible ; elle est de 57 degrés pour les îles Sickta dans l'Alaska, de 65 pour le gisement de Mackensie, de 70 pour celui de Groënland. Une concordance aussi complète est attribuée par M. Heer à l'inflexion des lignes isothermes miocènes, inflexion en rapport, sans doute, avec la distribution des terres et des mers, et qui ne serait pas sans analogie avec ce qui existe de nos jours, où l'isotherme de 0° s'éloigne peu du parallèle de 55° dans le centre des deux continents, tandis qu'il dépasse le 70° à la hauteur du Cap Nord. Et si des faits déjà si frappants concernent les temps tertiaires, on n'est pas surpris de constater pour les temps plus anciens une uniformité encore plus grande ; de sorte qu'il est tout indiqué de chercher à reprendre cette histoire à partir de son début.

Au commencement des époques sédimentaires, alors qu'aucune terre n'émergeait, deux courants océaniques, l'un supérieur, l'autre inférieur, portaient les eaux de l'équateur vers les pôles et celles des pôles vers l'équateur. Il y avait là une sorte de brassage qui rendait assez uniforme la température des eaux entourant le globe d'une enveloppe continue.

A la suite de la surrection des terres au-dessus des eaux, l'uniformité de la température terrestre a disparu. Les

courants marins ont été arrêtés dans leur marche et déviés dans leur direction. Le sol, en s'exhaussant, a atteint les régions froides de l'atmosphère, et les points élevés se sont constitués en condensateurs de façon à devenir des réservoirs de froid. Alors se sont dessinées les isothermes. Alors ont apparu les climats.

On a cependant émis la supposition que l'apparition des climats a pu se lier à un changement de position dans l'axe de rotation du globe par rapport au plan de l'orbite.

La perpendicularité de l'axe amènerait la régularisation des climats, selon quelques auteurs. Mais on a fait à cette hypothèse de grandes objections. Les pôles seraient toujours moins échauffés à cause de l'obliquité des rayons.

Il est remarquable que ces idées ont une origine très antique. Empédocle déjà explique comment « l'air cédant enfin à la violence du soleil, les pôles se penchèrent » et amenèrent ainsi à la fois l'inégalité des jours et des nuits et la « disparition du printemps perpétuel ».

Sans insister, et pour en revenir à la conclusion formulée tout à l'heure, remarquons que l'apparition des climats n'est d'ailleurs pas exclusivement liée à l'exhaussement des terres. Si tous les continents disparaissaient et si la terre se trouvait de nouveau recouverte d'eau, les climats s'atténueraient, mais ils ne disparaîtraient pas. Ce qui le prouve, c'est qu'on voit une calotte de glace dans l'hémisphère Sud qui est presque entièrement océanique.

La différenciation bien nette des climats paraît dater des débuts de l'âge crayeux ; pourtant déjà, bien auparavant, on constate une évolution préparatoire de ce grand phénomène. C'est ainsi que, depuis les temps carbonifères jusqu'à la période de l'infralias, les conditions les plus favorables au développement des plantes semblent s'être déplacées progressivement vers le Sud. Dans nos pays, les grands amas de combustibles (anthracites et houilles) sont d'âge primaire, tandis que dans la Virginie et dans

la Caroline du Nord (dont la latitude est déjà bien moindre) on trouve des bassins houillers datant seulement de l'époque triasique, à Richmond et à Chatans. Même à l'époque rhétienne, les mêmes conditions générales se sont réunies encore plus près de l'équateur, dans l'Inde, au Tonkin, dans le Sud de la Chine, pour produire d'énormes dépôts ligniteux.

En somme, ces dispositions nous préparent à la constatation de l'établissement progressif de l'état actuel des choses. La question se complique d'histoires locales dans lesquelles interviennent souvent des causes très diverses : en s'en tenant à ce qui paraît le plus général, on peut se borner à rappeler, en quelques lignes, plusieurs des nombreuses hypothèses dont le sujet a été l'occasion.

Certains auteurs ont cherché si le Soleil, au cours des périodes géologiques, n'avait pas subi des variations. Il ne faut pas oublier que ces variations n'ont pas pu être très considérables, car l'étude des fossiles les plus anciens comparés aux êtres d'aujourd'hui, fait voir que le Soleil devait avoir déjà les qualités essentielles dont il jouit à présent. Les gisements paléozoïques du sel gemme montrent aussi qu'il évaporait déjà les mers comme il le fait de nos jours, par exemple dans le Karaboghaz, sur la rive Sud-Est de la Caspienne.

Il faut évidemment, dans cette direction, se méfier des résultats, en apparence formels, du calcul.

Quand, par exemple, l'illustre M. Faye conclut de sa théorie qu'à l'époque houillère le Soleil n'avait encore que des dimensions très exigües, il faut se demander si on ne s'abuse pas sur la rapidité des modifications solaires, comparée à l'allure de l'évolution terrestre.

Ainsi, M. Blandet a voulu expliquer l'évolution des climats par une diminution progressive du diamètre apparent du Soleil. Actuellement, les climats sont réglés par le parallélisme des rayons solaires et si le Soleil était beaucoup plus gros, ses rayons éclaireraient plus de la moitié

du globe et il y aurait suppression totale des pôles de froid. Mais, d'après Helmholtz, le Soleil ne saurait se contracter que de 0^m,75 par an, ce qui exigerait 9 500 ans pour produire une diminution égale à une seule seconde d'arc dans le diamètre sous lequel nous le voyons. Ces diverses chronométries demandent à être conciliées.

Pour quelques auteurs, les modifications des climats pourraient se rattacher à des différences thermométriques dans les points de l'espace céleste où successivement passe la Terre.

Mais cette doctrine, malgré la tentative que Poisson a faite de l'appliquer à l'histoire calorifique du globe, ne semble pas soutenable. La température de l'espace, quelque valeur que Fourier lui assigne, doit demeurer à très peu près constante si elle a pour cause, comme il faut le croire, le rayonnement stellaire.

En face des géologues qui, en très grande majorité, comme nous l'avons vu, admettent une évolution continue des climats, il en est quelques-uns qui pensent que l'histoire en a été plus compliquée, admettant des vicissitudes, des alternances de *maxima* et de *minima*.

Lamarck ¹ remarque que le déplacement du bassin des mers produit une inégalité constamment variable dans la masse des rayons terrestres et qu'il en résulte nécessairement une variation du centre de gravité du globe, ainsi que de ses deux points polaires.

« En outre, dit-il, comme il paraît que cette variation, toute irrégulière qu'elle est, n'est pas assujettie à des limites, il est très vraisemblable que chaque point de la surface de la planète est réellement dans le cas de se trouver successivement dans *tous les climats divers*. »

On a émis l'idée que les alternatives présentées par la température générale de la terre pourraient être dues à des oscillations de l'axe terrestre, plus ou moins sem-

1. *Hydrogéologie*, p. 87.

blables à celle que les astronomes ont désignée sous le nom de mouvement de nutation.

Mais il s'en faut de beaucoup qu'on ait su distinguer ces prétendues vicissitudes générales de modifications locales qui pourraient tenir à des soulèvements ou à des déplacements de la mer.

C'est d'un ensemble de considérations de ce genre que M. Péroche a fait la base d'une hypothèse d'après laquelle, en conséquence de la précession des équinoxes, des attractions spéciales détermineraient le glissement progressif de l'écorce terrestre sur le noyau fluide qu'elle enveloppe. La conséquence serait un déplacement de pôle qui successivement occuperait des situations très diverses, entraînant avec lui toute la distribution climatérique.

A l'époque houillère, par exemple, le pôle se serait trouvé à la baie d'Hudson et alors l'île de Disco, au Groënland, où l'on recueille des empreintes de végétaux tropicaux, se serait trouvée par 60 degrés de latitude ; l'équateur était d'ailleurs plus chaud qu'aujourd'hui et les courants de la mer réchauffaient énergiquement les contrées septentrionales.

Mais ce système, pour séduisant qu'il ait paru à plusieurs auteurs, suscite cependant de graves objections. Il résulte, par exemple, des études paléontologiques d'Oswald Heer sur la distribution des flores fossiles, que dès l'apparition des climats le pôle était déjà exactement situé comme aujourd'hui et qu'il n'a jamais changé de place. Pendant la durée des temps tertiaires, les latitudes étaient disposées dans le même ordre que maintenant et la seule différence avec les latitudes modernes, c'est qu'elles recevaient plus de chaleur, de sorte que la ligne des tropiques remontait bien plus au Nord.

On a parfois émis l'opinion qu'à l'époque houillère l'atmosphère a dû présenter des caractères de composition tout à fait exceptionnels et renfermer une dose beaucoup plus grande que de nos jours de gaz acide carbonique. Mais

les études d'anatomie végétale auxquelles on a soumis les plantes primaires, en révélant leur parfaite conformité avec les végétaux actuels, démontrent que les conditions générales de composition chimique du milieu devaient être fort voisines de celles qui règnent encore. L'étude des animaux, et spécialement des insectes, conduisent aux mêmes conclusions.

8 — LA FONCTION BIOLOGIQUE PENDANT LES TEMPS GÉOLOGIQUES

On trouve qu'à toutes les époques du développement terrestre comprises entre la première apparition des êtres vivants et les temps actuels, la fonction biologique a été remplie sans interruption dans la physiologie tellurique. On trouve même qu'elle a toujours été remplie de la même manière, c'est-à-dire par la collaboration du règne animal et du règne végétal.

Cette remarque est extrêmement riche en enseignements, quant à l'économie générale du globe et en indique la constance presque parfaite, puisque les organismes sont bien trop délicats pour persister en présence de perturbations un peu marquées dans le milieu général.

Nous savons, par exemple, que les trilobites des époques primaires, du cambrien si l'on veut, avaient trop d'analogies anatomiques avec les crustacés actuels pour ne pas subir sensiblement les mêmes nécessités physiologiques. La moindre modification importante dans la composition de la mer, aurait vraisemblablement empêché la vie des trilobites comme elle empêcherait la vie de nos crevettes ou de nos langoustes.

Et on peut répéter l'observation pour l'océan aérien, car les végétaux les plus anciens, ceux du terrain dévonien ou du terrain houiller ressemblent trop aux plantes qui végètent autour de nous, pour qu'elles aient pu s'accommoder d'un milieu qui serait impropre à la vie de celles-ci.

L'origine de la vie sur la Terre, l'éclosion de la première plante et du premier animal, sont des phénomènes auxquels le Soleil a pris nécessairement la part la plus haute : c'est à un certain moment du refroidissement spontané du globe, que les conditions du milieu se sont trouvées favorables à la réalisation du phénomène biologique.

Bien des penseurs ont cherché à pénétrer le mystère de ce grand sujet. Dans son *Rapport* publié à l'occasion de l'Exposition de 1867 *Sur les progrès des sciences zoologiques en France*, Henri Milne Edward, amené par son sujet en présence du problème des origines de la vie sur le globe, en vient à faire la supposition suivante : « Serait-ce, écrit-il, en passant dans quelque couche particulière de la matière impondérable dont les espaces célestes paraissent être chargés, que notre planète aurait rencontré l'agent susceptible d'imprimer ce mouvement particulier aux substances organisables, ou faut-il attribuer ce phénomène à une action créatrice d'un autre ordre ? » Avant Milne Edward, Ch. Naudin donnant son opinion sur le débat qui passionnait alors les naturalistes, avait opposé à l'hypothèse d'une organisation spontanée de la matière, celle d'une origine cosmique des espèces primordiales, soit végétales, soit animales. William Thomson, dans le discours présidentiel qu'il lut en 1871 à Edimbourg, devant l'Association britannique, se prononce également en faveur d'une origine extraterrestre de la vie.

En tous cas, si les animaux et les végétaux de toutes les époques ont évidemment réalisé la même fonction générale, il est incontestable que les formes ont changé avec le temps, de telle façon que chaque moment de l'évolution terrestre est caractérisé par ses fossiles. C'est constater la liaison intime qui relie les modifications successives du milieu à celles des êtres qui y vivent.

Dans cette direction, il se présente même à l'esprit une conception qu'on peut rappeler ici parce qu'elle a l'avantage de faire profiter les problèmes biologiques des notions

certaines du domaine inorganique, avec lesquelles il n'est pas déraisonnable d'établir des comparaisons.

Pour ma part, et tout en laissant de côté comme inabordable la question de savoir pourquoi et comment les phénomènes biologiques sont tout à coup venus compliquer les manifestations dynamiques de la nature, je ne puis m'empêcher de penser que l'hypothèse la plus simple semble être que la force biologique, antérieure comme les autres forces, se réservait pour le moment où les conditions du milieu seraient favorables à la manifestation, à la conservation et à la multiplication de ses produits.

A cet égard, et quelles que puissent être les différences essentielles entre les forces biologiques et les forces purement physico-chimiques, il y a une analogie complète. C'est d'après les conditions du milieu qu'à un certain moment se sont constitués les premiers minéraux cristallisés, succédant à des combinaisons où les forces cristallogéniques n'avaient pas eu à intervenir, à cause de la fluidité universelle des substances. Or, pour ces forces cristallogéniques on constate que leurs produits, c'est-à-dire les minéraux, se succèdent dans le temps pendant que se présentent les unes après les autres les étapes du développement terrestre. Les conditions de la surface allant constamment en s'adoucissant, les minéraux de voie purement sèche font place à des minéraux de voie mixte ou hydrothermale et ceux-ci, à leur tour, aux cristallisations de voie humide caractéristiques des terrains récents. De même les manifestations des forces biologiques, c'est-à-dire les faunes et les flores, se distribuent dans le temps de façon à dater de leur côté les stases du développement géologique. Tout d'abord, la mer universelle et uniforme impose en tous lieux des conditions partout les mêmes, qui ne subsisteront plus quand les continents auront surgi. Puis l'épaisseur constamment diminuée d'une atmosphère qui s'épure et devient transparente aux rayons solaires, en amenant la constitution des climats, détermine des conditions de mi-

lieu variables avec les points. La force biologique, comme tout à l'heure la force cristallogénique, et avec un bien autre luxe de nuances, à cause de la délicatesse incomparablement plus grande de ses produits, se manifestera de façons diverses qui seront, pour une grande part, le reflet des conditions extérieures.

Les conditions variant d'une façon continue, on en verra les manifestations s'accroître d'une manière suivie dans une direction déterminée. On suivra pas à pas les progrès successifs de telle ou telle fonction, de tel ou tel sens, par ceux de l'organisme qui leur est relatif. Et l'on peut prévoir qu'il en sera ainsi jusqu'à l'acquisition par le milieu terrestre du maximum des conditions favorables à l'éclosion de chaque catégorie de produits biologiques ; — les périodes suivantes, de moins en moins propices, devront être marquées par des formes de moins en moins parfaites. De sorte que, dans la série des temps, on verra d'abord un moment d'apogée pour chaque type, et ensuite un moment d'apogée pour l'être vivant considéré d'une manière absolue.

Le renouvellement des flores et des faunes aux diverses époques entre autres conséquences capitales pour la physiologie générale de la terre, nous permet de constater le fait considérable de l'application et de la modification des climats au travers des périodes géologiques. Ce que nous avons dit précédemment des liens actuels de la flore et de la faune avec les régions climatiques nous permettra d'être bref ici, sur ce grand sujet.

L'étude des terrains les plus anciens nous montre déjà des différences régionales entre les êtres vivants d'une même période ; mais elles sont incomparablement plus faibles qu'à présent. Ainsi, nombre d'espèces siluriennes d'Amérique ont été retrouvées en Europe, non pas absolument identiques, mais au contraire pourvues de quelques légères différences.

D'une façon générale, les faunes actuelles ont les plus

grandes affinités avec les faunes tertiaires des mêmes régions géographiques ; ainsi les physes et les mélanies tertiaires des États-Unis appartiennent aux mêmes genres que les formes vivantes du Nouveau Continent, tandis que les physes, les mélanies et les mélanopsides tertiaires d'Europe ont les caractères des espèces actuelles de l'ancien continent. Les paléontologistes en ont conclu que, durant la période tertiaire, les différences entre les animaux des deux continents étaient tout aussi accentuées qu'elles le sont de nos jours.

Ceci posé, nous pouvons remonter très rapidement le cours des temps et rechercher, en la remontant aussi, la marche du phénomène climatologique aujourd'hui si accusé.

Le témoignage de la flore nous enseigne, dans un très grand nombre de cas, que la température moyenne de nos pays était plus élevée à l'époque quaternaire que de nos jours. C'est ainsi qu'en diverses localités, comme à Moret (Seine-et-Marne), les figuiers poussaient en pleine terre et donnaient des sycones semblables à celles qui ne se produisent plus spontanément qu'à des latitudes bien plus méridionales.

De même, des gisements de diluvium ancien ont révélé l'existence dans nos rivières des corbicules déjà mentionnés, dont les correspondants habitent aujourd'hui les cours d'eau des pays très chauds.

Nous n'avons pas à revenir ici sur ce qui a déjà été dit au sujet de la « période glaciaire ».

Des gisements pliocènes renferment les témoignages en des pays maintenant très tempérés d'une flore bien plus chaude. A Meximieux (Ain), de Saporta a reconnu le laurier-rose, le bambou, le liquidambar, le grenadier, le laurier des Canaries et il en conclut une température moyenne de 17° au lieu de celle de 11°,8 qui règne aujourd'hui. Il faudrait descendre jusqu'à Palerme pour retrouver maintenant une semblable végétation.

« La forêt de Meximieux, dit le célèbre paléontologiste, ressemblait encore à celles qui font l'admiration des voyageurs dans l'archipel des Canaries. Ce sont, en partie au moins, les mêmes essences qui reparaissent, en tenant compte de la richesse plus grande dont la localité pliocène garde le privilège. Pour émettre à son égard une juste appréciation, il faut joindre aux Canaries l'Amérique du Nord, à l'Europe moderne l'Asie caucasienne et orientale et recomposer au moyen des éléments empruntés à ces divers pays un ensemble qui donnera la mesure exacte de la végétation qui couvrait alors le sol aux environs de Lyon. »

Pour le miocène, le même botaniste conclut à une climatologie générale encore plus chaude.

« Il est difficile de ne pas admettre que la mer miocène (du Midi de la France) n'ait été pour l'Europe, qu'elle rendait semblable à l'Archipel indien, une cause puissante d'adoucissement du climat. Une température égale, clémente durant l'hiver, pluvieuse pendant l'été, n'a cessé tant qu'elle a persisté de régner sur notre continent et d'y favoriser le maintien d'une végétation aussi riche que variée. »

Et il est tout naturel de joindre aux précédentes citations l'opinion de la même autorité pour le climat éocène.

« L'influence d'une nature chaude, d'un climat comprenant des alternatives très prononcées de saisons sèches et brûlantes et de saisons pluvieuses et tempérées ; favorables pourtant au développement d'une végétation riche et variée, à la fois élégante et frêle ; peuplée de formes originales, mais généralement petites, ayant une certaine maigreur distinctive et quelque chose de dur, de coriace dans les formes ; privée d'opulence, mais vivace et surtout diversifiée suivant les pays et les stations, ressemblant au total à celle de l'Afrique intérieure avec des traits empruntés à l'Asie méridionale et à la Chine : — tels sont, à ce qu'il me semble, les caractères inhérents à la flore éocène du Midi de l'Europe. »

La transition nous prépare à trouver pour les temps crétacés une météorologie subtropicale : le lac d'Armaillé, dans l'Ain, fournit les vestiges de toute une forêt de Cycadées qui descendent des arbres jurassiques à l'ombre desquels a évolué la majestueuse population des reptiles secondaires, se rattachant ainsi à l'exubérante végétation houillère.

D'après M. Grand'Eury, la nature fistuleuse des plantes houillères gorgées de suc indique une rapidité de croissance extraordinaire. Le climat devait être chaud et humide, analogue à celui qui règne encore en quelques points de la Nouvelle-Zélande. La dimension des insectes des temps houillers est conforme à cette dernière conclusion.

A toutes les époques par conséquent, la répartition des êtres vivants sur la Terre se montre en relation directe avec l'activité solaire et, pour beaucoup d'entre eux, il se présente en outre une circonstance digne de la plus haute attention. C'est que, par le seul fait de leur fonctionnement physiologique, ils sont capables d'emmagasiner dans leurs tissus et pour un temps plus ou moins long, une quantité d'ailleurs variable suivant le cas de l'énergie du Soleil.

Ce mécanisme est porté à son maximum chez les plantes qui, à cause de la fonction chlorophyllienne, rendent latente une somme d'énergie solaire représentée exactement par la quantité de chaleur dégagée par leur propre combustion. C'est, sans rhétorique, qu'on peut constater la réapparition de la radiation du soleil qui brillait à l'époque houillère quand on brûle aujourd'hui des morceaux de charbon de terre.

La fonction biologique se manifeste d'ailleurs, suivant les cas, par des effets différents les uns des autres et qu'on pourrait soumettre à une espèce de classification.

Dans une première, série on peut ranger des productions rocheuses résultant de l'accumulation en certains points, par les causes sédimentaires normales, de débris de plantes et d'animaux. Les courants entassent dans les deltas des

fragments de végétaux qui deviendront de la houille ; et dans les estuaires, comme dans les abîmes sous-marins, des carapaces de diatomées. Ailleurs, les coquilles des mollusques feront, par charriage, des couches entières et l'on rencontrera des assises formées d'articles d'encrines, de tests de radiolaires ou de foraminifères comme les millioles, les nummulites ou les fusulines. Ailleurs encore, mais plus rarement, des ossuaires où les débris de mammifères et d'autres vertébrés font une portion du sol : les gisements de Pikermi, de Sansan, d'Anvers pour les cétacés, sont à citer à cet égard. Les déjections animales, converties en coprolithes se sont parfois accumulées aussi comme dans le lias du Sussex : mais il se peut que leur réunion soit, comme celle des éléments organiques des bone-beds, causée par l'exercice de la sédimentation souterraine.

Une seconde catégorie de faits concerne l'édification de massifs constitués par l'entassement sur place des restes des générations successives demandant à leurs ancêtres le support même de leur établissement. D'après M. Grand'Eury, les végétaux houillers sont groupés parfois en forêts fossilisées sans charriage et les assises marines nous procurent souvent des incrustations volumineuses de diverses algues calcaires de la catégorie des nullipores et des corallines. De même, des couches, appelées diatomépélites et comparées à des farines fossiles, sont comme des lits d'algues sili- ceuses.

Mais les animaux sont plus actifs encore dans cette série et méritent mieux la qualification de *constructeurs de continents* que Michelet leur a attribuée. Les huîtres, par exemple, et certains mollusques analogues, édifient des bancs dont la surface et l'épaisseur peuvent atteindre les dimensions de couches entières du sol et les hippurites, à cause du plus grand volume de leur coquille, les dépassent encore en activité. Il suffit d'un coup d'œil sur les escarpements de la Montagne des Cornes qui borde l'étang de Berre, pour être immédiatement édifié sur ce chapitre. Et

pourtant l'œuvre de ces pélécy-podes est peu de chose à côté de celle des madrépores, qui ont édifié des îles entières, dès les temps dévoniens et carbonifères, — avec un maximum aux époques jurassiques, — pour continuer si activement leur œuvre dans l'Océan pacifique actuel.

En face de l'efficacité édicatrice de l'être vivant, il faut considérer la part qu'il prend dans les phénomènes de la dénudation et l'on retrouve, à tous les moments des époques géologiques, des traces certaines de phénomènes cités sous ce chef pour la période présente.

Aussi est-ce avec intérêt, mais sans surprise, qu'on retrouve pour des moments très divers, des témoignages de la continuité des phénomènes si complexes d'où résulte la terre végétale. Nous avons des échantillons fossiles du sol arable du terrain jurassique supérieur dans l'île de Portland, du terrain houiller au cap Breton et bien ailleurs.

Dans ces derniers temps, M. Bernard Renault nous a révélé l'activité géologique des organismes sous une forme toute nouvelle. Ses belles études microscopiques lui ont démontré la présence, dans la houille et dans plusieurs autres combustibles minéraux, de légions de microbes et surtout de microcoques et de bacilles, et l'on peut dire sans exagération qu'il en résulte un renouvellement complet de questions capitales qu'on croyait connaître et qu'il faut étudier de nouveau.

M. Renault, en effet, n'hésite pas à proclamer que la houille est un produit de l'activité microbienne et plusieurs auteurs ont prétendu donner à cette conclusion l'appui de hautes considérations chimiques. Sans avoir ici le loisir et la place d'examiner la question à fond, il me semble cependant que de très grandes objections s'opposent à l'admission immédiate de ces notions. Leur conséquence est que la houillification a été un phénomène pour ainsi dire instantané, le combustible étant formé avant son enfouissement, et l'on invoque comme preuve

à cet égard la présence, en plein terrain houiller, de galets de houille ayant la même composition que celle des couches en place. Or, cette rapidité de constitution du combustible entraîne avec elle bien des difficultés. D'abord il faut supposer que depuis l'immense antiquité de la période houillère, la substance du charbon n'a subi dans le sol aucune modification, et cela semble bien impossible ne serait-ce qu'en raison de son association avec des roches qui, comme les schistes, sont bien éloignées de conserver aujourd'hui leurs qualités initiales. D'un autre côté la présence dans bien des combustibles du gaz hydrogène carboné ou grisou, dont le départ explique la différence qui sépare la houille du bois ne se concilie pas avec l'ancienneté de la transformation et la situation superficielle des masses transformées. On dit bien que ce gaz a pu, dans certains cas, rester emprisonné dans les pores du charbon, mais c'est une assertion qu'il serait bien difficile de justifier. On reconnaît en effet que le combustible a subi une énorme compression que M. Renault a même cherché à évaluer numériquement. Comment cette action mécanique n'aurait-elle pas chassé tout le gaz, s'il avait déjà été libéré au moment de l'enfouissement ?

Suivant moi, l'action microbienne, qu'il est si intéressant de constater et d'étudier dans le détail, est antérieure à la houillification et n'a avec elle que des rapports très éloignés. La production progressive de la houille est un détail dans le grand phénomène du métamorphisme général et tient à l'activité chimique engendrée dans les profondeurs par un échauffement croissant. On objecte que la substance des microbes n'est pas houillifiée comme les végétaux environnants, mais cela peut provenir de sa composition chimique initiale sur laquelle nous ne sommes point renseignés.

Pour ce qui est des galets de houille, il est bien clair qu'ils ont pu commencer par être des galets de lignite ou de tourbe et que leur transformation a pu se réaliser

en même temps que celle des couches d'où ils avaient été arrachés, les faibles différences de composition pouvant résulter précisément des conditions spéciales dans lesquelles ces petits fragments se sont trouvés.

Il faut d'ailleurs dire un mot d'une dernière catégorie de produits qui, quoique moins directement, se rattachent à l'activité biologique. Il s'agit de minéraux qui ont trouvé des conditions particulièrement favorables à leur génération, dans les couches formées de résidus organiques. Par exemple la pyrite de fer et toute une catégorie de substances privées d'oxygène, se sont produites en abondance dans les couches de combustibles justement à cause de l'affinité des matières organiques pour le gaz comburant par excellence. Des suintements de sulfate de fer traversant des lits de houille ont vraiment brûlé de la houille et déposé, par conséquent, le sulfure insoluble résultant de cette réaction.

De même, les accumulations de tests de diatomées ou de radiolaires constituent des milieux spécialement propres au développement des phénomènes de la silification et, conséquemment, l'histoire de bien des concrétions siliiceuses comprend, comme un de ses chapitres indispensables, l'intervention des forces biologiques. Et cette remarque permet de croire que ces dernières forces sont intervenues bien plus activement qu'on ne serait porté à le croire *a priori* dans l'édification des couches du sol.

CONCLUSION

Les faits qui ont été résumés dans les pages précédentes pourraient suffire pour justifier pleinement les assertions formulées dans notre Introduction et si on me permet de l'ajouter, les doctrines qui m'ont paru vraies dès mes débuts dans la science et que je me suis trouvé constamment amené, par la puissance des observations et des expériences et malgré des critiques nombreuses et variées, souvent très âpres, à appuyer par mes travaux.

Dans les chapitres les plus variés du domaine géologique, nous voyons surgir les témoignages de la lente évolution dont le globe terrestre est le théâtre, partout s'effacer la limite qu'on avait cru voir tout d'abord entre l'époque actuelle et les temps précédents.

A cet égard, on me permettra d'introduire ici, en quelques mots, la note personnelle que j'aurai, je crois, facilement justifiée en rappelant la succession de quelques faits.

A l'époque de mes premières études, j'ai été saisi d'un sincère enthousiasme par le spectacle des grandes découvertes, si récentes encore, grâce auxquelles les voiles dont le passé était resté enveloppé venaient enfin d'être déchirés. M. Elie de Beaumont, dans toute l'autorité de sa haute situation, représentait la résistance au progrès et toute une phalange de chercheurs faisait preuve des plus

hautes qualités morales, en défendant contre lui les notions tirées de l'observation des faits.

C'est par l'homme fossile et en conséquence par le diluvium, que la Géologie m'apparut d'abord avec son caractère le plus large et le plus militant — le plus passionnant en un mot.

M. Belgrand exposait avec une assurance qui devait entraîner bien des adhésions, un ensemble de doctrines qui me sembla contraster par son apparence absolue avec les enseignements de Ch. Lyell, si profondément empreints du caractère spécial à l'histoire naturelle. Et d'instinct, je sentis que M. Belgrand avait tort, absolument tort, malgré l'immense succès de ses publications.

Je ne craignis pas de le dire et même de l'imprimer et je me rappelle avoir reçu à cette occasion de bienveillants conseils émanant de sources non suspectes et qui étaient inspirées par le souci de mon avenir. Il me parut cependant impossible de m'y rendre et même je n'hésitai pas à protester, selon mes moyens, contre les enseignements de M. Elie de Beaumont, de son élève, M. Ch. Sainte-Claire Deville, de M. Hébert et on peut le dire de tous les géologues officiels de l'époque. Et c'est dans ces conditions que parut, en 1879, le résumé d'un cours que j'avais donné au Museum l'année précédente, sous ce titre : *Les causes actuelles en géologie*.

Ce livre est très critiquable et je serais le premier à y montrer une série de points que je n'accepterais plus aujourd'hui ; mais il est conforme aux idées générales que je m'étais faites au début et que je continue de me faire sur les grands phénomènes géologiques. La continuité absolue des périodes successives y est proclamée et l'analogie de causes des phénomènes comparables de tous les temps y est affirmée : la nature volcanique des roches éruptives anciennes, par exemple.

La sculpture du sol et le creusement des vallées y sont montrés aussi comme plaidant contre la supposition cata-

clysmienne à laquelle d'habitude on les rattachait comme à leur cause évidente et la suite de mes recherches dans cette voie en provoquant des discussions de plusieurs genres n'a fait que confirmer mes idées premières.

Une autre préoccupation, qui ne m'a jamais quitté, a été de protester contre la prétention d'une série d'auteurs de soumettre les études géologiques aux méthodes de la géométrie.

La bruyante et encombrante doctrine du *Réseau pentagonal*, qui a fait dévier pendant tant d'années la Géologie descriptive de son but, en conduisant les observateurs à trouver quand même des alignements, pour des objets quelconques, m'a toujours paru absolument opposée à la saine compréhension de la nature. Je n'ai pas craint de le dire à maintes reprises, soit oralement dans la Chaire du Muséum, soit dans des écrits et je puis constater maintenant qu'après avoir été à peu près tout seul de mon avis, je me trouve d'accord avec tous les géologues. Les récentes études sur les montagnes ont vraiment miné de fond en comble tout ce qu'avait dit Élie de Beaumont soit sur l'allure des soulèvements, soit sur l'inefficacité explicative des séismes actuels, soit sur les directions des chaînes ; c'est un immense édifice dont il ne reste absolument rien.

Je me suis inscrit de même contre la rêverie tétraédrique, dont les adhérents ont été si nombreux, mais qui semble s'évanouir devant le désaccord même de ses partisans, qui en arrivent à avoir chacun leur tétraèdre personnel quand ils n'ont pas à eux seuls plusieurs tétraèdres différents.

Et la géométrie sera aussi contrainte de renoncer à l'allure magistrale qu'elle a prise dans d'autres chapitres de la géologie. Par exemple elle est bien incapable de faire autre chose qu'une caricature des faits naturels quand elle prétend définir les courbes et les profils des vallées. La prétendue constitution du *profil d'équilibre*, qui sup-

pose lui-même un terme à l'érosion, est une pure illusion ; et ici comme partout la faillite de la géométrie tellurique est complète.

Pour que cet ordre de considération rendît les services qu'on en attend il faudrait que la Terre fût sensiblement le contraire de ce qu'elle est, et d'abord qu'elle fût parfaitement homogène et soumise en tous ses points, à des actions identiques.

Élie de Beaumont réunissait tout ce qui dérive de l'hétérogénéité et des inégalités de condition sous le nom de perturbations ; et il arrivait qu'elles étaient ordinairement si fortes qu'elles masquaient absolument le phénomène principal. C'est le maximum que puisse atteindre l'esprit systématique.

Un autre fait qui m'a paru dominer toute la Géologie et cela depuis mes premières études, c'est l'intense activité qui règne d'une manière ininterrompue dans l'épaisseur des couches du sol. Tout y change à chaque instant, tout s'y arrange, tout s'y remplace, comme dans un tissu organique et l'on peut dire que, dans les anciennes formations, il ne subsiste presque rien de la substance originelle. Avec ce point de vue que j'appelle *activiste*, tout le sentiment qu'on se fait généralement du milieu géologique est profondément changé ; l'évolution se manifeste partout, non seulement à la surface du sol, mais dans ses profondeurs, et la philosophie la plus haute se dégage même des observations les plus circonscrites. On peut prévoir que la Géologie générale en recevra un accroissement correspondant.

Je répète que je ne me dissimule pas le reproche que l'on me fera, sans doute, d'exagérer l'importance de certaines conceptions et de manquer aux règles de la modestie en rappelant la constance de mes tendances scientifiques. Mon excuse sera, je l'espère, dans le besoin que j'éprouve bien naturellement de constater qu'après les critiques si sévères dont mes publications

ont été souvent l'objet, on a généralement négligé de reconnaître le rapprochement progressif de certains points de vue devenus classiques avec mes opinions antérieures. En attendant mieux, on peut noter que l'« actualisme » qu'on m'a parfois très rudement reproché de pratiquer, est devenu tout à fait de mise. Je me flatte que les idées évolueront encore dans le même sens, en ce qui concerne l'allure générale de la période quaternaire, les causes de la disparition des anciens glaciers et les incidents relatifs à leur capture ; les phénomènes de la dénudation et de la sédimentation souterraines ; l'allure du phénomène orogénique et bien d'autres questions, qui m'ont occupé et que j'ai cherché à élucider par la collaboration de l'observation et de l'expérience.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
PRÉFACE	v
INTRODUCTION	
ÉVOLUTION DES IDÉES EN GÉOLOGIE GÉNÉRALE PENDANT LE XIX^e SIÈCLE.. . . .	
	I
<i>Le Cataclysmisme ; Cuvier et son école.</i>	12
<i>L'Uniformitarisme ; Lyell et son école</i>	22
<i>L'Actualisme ; Constant Prévost et son école</i>	24
<i>L'Activisme ; son caractère et sa portée</i>	26
PREMIÈRE PARTIE	
CARACTÈRE PHYSIOLOGIQUE DES GRANDS PHÉNOMÈNES GÉOLOGIQUES ACTUELS	
CHAPITRE PREMIER. — LES CENTRES DE L'ACTIVITÉ GÉOLOGIQUE ACTUELLE.	34
1. La chaleur propre du globe comme centre d'activité géologique.	34
2. La pesanteur comme cause d'activité géologique.	50
3. L'activité solaire comme cause de phénomènes géolo- giques.	55
CHAPITRE II. — LES APPAREILS DE LA PHYSIOLOGIE TELLURIQUE	62
1. L'écorce flexible.	62
2. Le volcan.	75
3. La nappe d'eau profonde.	87
4. La nappe d'eau superficielle	103
5. La mer.	122
6 Le glacier	129
7. L'atmosphère.	135
8. L'être vivant.	155

DEUXIÈME PARTIE

PHYSIOLOGIE COMPARÉE DES ÉPOQUES GÉOLOGIQUES SUCCESSIVES

1. La fonction corticale pendant les temps géologiques	175
2 La fonction volcanique pendant les temps géologiques.	179
3. La fonction aqueuse profonde ou bathyrique pendant les temps géologiques	182
4. La fonction aqueuse superficielle ou épipolhydrique pen- dant les temps géologiques	215
5 La fonction océanique pendant les temps géologiques	276
6 La fonction glaciaire pendant les temps géologiques	291
7 La fonction atmosphérique pendant les temps géolo- giques	310
8. La fonction biologique pendant les temps géologiques	317
CONCLUSION.	329