

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

GÉOLOGIE

2^e édition revue
et augmentée
avec 32 pages couleurs

Géologie générale

Du minéral aux géosphères

Frédéric BOULVAIN

ellipses

Chapitre I

Introduction

Qu'est-ce que la géologie ?

Les Grecs appelaient γη la Terre sur laquelle nous vivons. Cette racine intervient dans une foule de termes tels que *géologie*, *géodésie*, *géochimie*, *géomorphologie*, *géochronologie*, etc. Ces sciences et techniques constituent ce que l'on appelle les *Sciences de la Terre*.

L'étude mathématique de la Terre a donné naissance à la *géodésie* (détermination de la forme et des dimensions de la Terre) et à la *géostatistique* (application des méthodes statistiques aux problèmes géologiques et en particulier à l'évaluation des gisements). L'application des méthodes et des techniques de la physique à l'étude de la Terre constitue la *géophysique*, que l'on peut subdiviser suivant ses intérêts en aéronomie (étude des couches élevées de l'atmosphère), météorologie, océanographie, géomagnétisme, sismologie et gravimétrie (étude du champ de pesanteur). L'application des méthodes chimiques et des lois de la physico-chimie à l'étude des matériaux de l'écorce terrestre débouche sur la *minéralogie* et la *pétrologie* (étude des roches, du grec *πετρος*), tandis que la *géochimie* étudie la distribution des éléments chimiques dans les roches, dans les sols, dans l'hydrosphère et dans l'atmosphère.

Les roches renferment parfois des restes d'animaux ou de végétaux. La *paléontologie* décrit ces fossiles et recherche leur filiation avec les organismes actuels, de manière à fixer les étapes de l'évolution du monde vivant.

La *géologie* au sens strict est la science qui traite de la composition, de la structure, de l'histoire et de l'évolution des couches internes et externes de la Terre. Cette étude se fonde sur l'observation rigoureuse des parties de l'écorce terrestre accessibles à nos observations, ce qui en fait avant tout une science naturelle. Les études géologiques s'articulent autour de trois thèmes principaux :

(1) la connaissance des matériaux de l'écorce terrestre par le biais de la *minéralogie* et de la *pétrographie* ;

(2) l'analyse des processus qui opèrent à la surface et à l'intérieur de la Terre : c'est le champ d'étude de la *géodynamique*, au sein de laquelle on distingue une géodynamique externe qui décrit notamment les phénomènes d'érosion et de sédimentation et une géodynamique interne qui s'attache à l'étude des processus à l'origine des reliefs (magmatisme, tectonique...). A chacune de ces catégories se rattachent des branches plus spécialisées de la géologie, comme la *sédimentologie* (étude des sédiments et de leur genèse), la *tectonique* (étude des déformations de l'écorce terrestre), la *volcanologie*, etc.

(3) la détermination de la succession des événements, enregistrés dans les roches, qui fait l'objet de la *géologie historique*. Elle comporte deux volets essentiels : la *stratigraphie* qui étudie la succession des couches rocheuses et des fossiles qu'elles contiennent et la *paléogéographie* qui s'efforce de reconstituer les paysages géographiques qui ont existé aux différentes périodes géologiques.

Ce rapide survol de la diversité des Sciences de la Terre en général et de la géologie en particulier montre son caractère nécessairement interdisciplinaire, au carrefour de

plusieurs grandes branches de la connaissance : la physique, la chimie, les mathématiques, la géographie, la biologie (Fig. I.1).

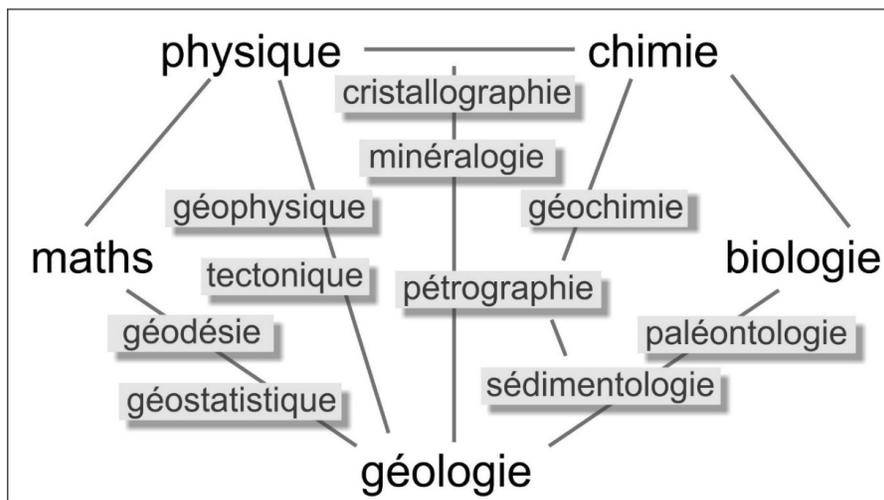


Figure I.1 : diversité des Sciences de la Terre et relations avec d'autres disciplines.

De nos jours, la *planétologie* utilise certaines techniques de la géologie pour l'étude des planètes et des satellites. Le contact direct étant rare, les interprétations sont surtout basées sur des mesures à distance : spectrométrie, imagerie, etc., validées par les indispensables références à la Terre.

Pour en savoir plus

B. Landry, J. Beaulieu, M. Gauthier, M. Lucotte, M. Moingt, S. Occhietti, D.L. Pinti & M. Quirion, 2013. *Notions de géologie* (4^e édition). Modulo, 656 p.

M. Hoffert, A. Schaaf, M. Tardy, A. Baldeyrou Bailly, G. Merzeraud, A. Brahic, & R. Maury, 2014. *Sciences de la Terre et de l'Univers* (3^e édition). De Boeck Supérieur, 832 p.

S. Marshak, 2022. *Earth : portrait of a planet*. W.W. Norton & Co, 1008 p.

C. Pomerol, Y. Lagabrielle & M. Renard, 2011. *Eléments de géologie*. Dunod, 944 p.

M. Renard, Y. Lagabrielle, E. Martin, M. de Rafélis, S. Leroy & N. Coltice, 2021. *Eléments de géologie* (17^e édition). Dunod, 1152 p.

Chapitre II

Un bref historique

De la naissance de la stratigraphie aux plaques en mouvement

1. LES BASES DE LA GEOLOGIE

Bien que de nombreux aspects de ce que nous appelons aujourd'hui *géologie* aient inspiré les réflexions d'auteurs aussi anciens que les auteurs grecs ou romains (on se référera aux ouvrages cités en fin de chapitre), on peut probablement dire que les bases de la *science* géologique ont été jetées par le Danois Nicolas Sténon (1638-1686), dans son *Prodrome d'une dissertation sur un solide naturellement contenu dans l'intérieur d'un solide* (1669).

Dans cet ouvrage, après avoir démontré que les coquillages fossiles et autres débris calcaires sont des restes d'anciens organismes vivants, il déduit, comme Léonard de Vinci avant lui, que les terrains qui les contiennent se sont déposés au fond des eaux et que :

« *Au temps où se formait une strate quelconque, ou bien elle était circonscrite sur ses côtés par un autre corps solide, ou bien elle couvrait tout le globe de la Terre* » et « *Au temps où se formait l'une des strates les plus élevées, la strate inférieure avait déjà acquis une consistance solide* » (Prodrome, 1669, p. 30).

Il s'agit bel et bien des principes fondateurs de la *stratigraphie* : le principe de continuité des couches et de superposition, impliquant que toute couche ou strate géologique est plus récente que celle qu'elle surmonte (Fig. II.1A).

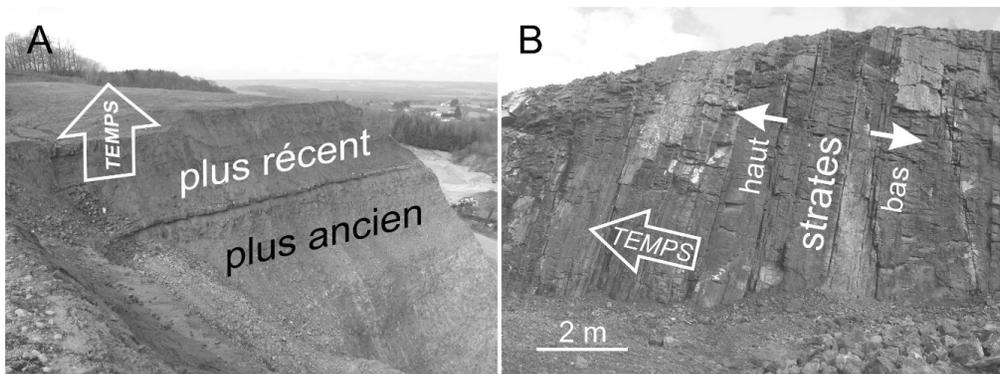


Figure II.1 : illustration du principe de superposition. A : strates horizontales, Jurassique, Tontelange, Belgique. B : strates inclinées, Dévonien, Baileux, Belgique.

Un second principe énoncé par Sténon est tout aussi fondamental et tout aussi révolutionnaire :

« (...) les strates, tant perpendiculaires à l'horizon qu'inclinées sur lui, en un autre temps ont été parallèles à l'horizon » (Prodrome, 1669, pp. 30-31).

En d'autres termes, l'inclinaison des couches témoigne de leur déformation : c'est le principe fondateur de la *tectonique* (Fig. II.1B). Sténon applique ce principe à la formation des chaînes de montagnes, en commettant cependant une erreur de généralisation, celle de supposer que l'inclinaison des couches est toujours due à un phénomène d'effondrement par disparition de couches plus anciennes, plutôt que par un mouvement de poussée latérale.

L'originalité de Sténon par rapport à ses prédécesseurs vient aussi de sa démarche de type naturaliste : ses principes sont appuyés non sur une réflexion philosophique, mais sur des observations de terrain.

2. L'HISTOIRE DU MONDE

Connu comme l'auteur d'une monumentale *Histoire naturelle*, Georges-Louis Leclercq, Comte de Buffon (1707-1788) s'est également intéressé à l'histoire de la Terre. Son apport est celui d'une rupture avec le *dilluvianisme* de ses prédécesseurs (Johann Lehmann et Benoît de Maillet pour ne citer que ces deux auteurs). Ce principe ancien, inspiré de la notion biblique de Déluge universel, postulait que l'ensemble des chaînes de montagnes et des roches sont des dépôts sous-marins. Buffon par contre, assigne une origine magmatique aux montagnes les plus anciennes. Le Globe est passé par un état fondu, puis son lent refroidissement a solidifié la matière en fusion qui a formé ces irrégularités que sont les grandes montagnes. Il propose dans ses *Epoques de la Nature* (1778) une première histoire du monde en sept époques dont voici les étapes essentielles :

- la Terre et les planètes prennent leur forme en état de fusion, par arrachement d'un jet de matière du Soleil suite au passage d'une comète ;
- la Terre se consolide en une grosse masse vitreuse que l'on retrouve dans le noyau des grandes montagnes, sortes de boursouflures ;
- les eaux couvrent les continents : toute l'histoire sédimentaire est contractée en une seule époque. Apparition des animaux à coquilles dont le squelette forme le calcaire ;
- les eaux se retirent, provoquant le creusement des vallées. Début du volcanisme ;
- les éléphants et autres animaux du Midi habitent dans les terres du Nord, encore chaudes, qui ont été les premières fécondes ;
- séparation des continents ; effondrement de l'Atlantide, apparition des hommes. Poursuite du refroidissement, naissance des rennes ; les glaces alpines gagnent du terrain ;
- naissance et déchéance de grandes civilisations.

De plus, Buffon croit pouvoir dater ces époques en calculant le refroidissement de la Terre, par extrapolation à partir du refroidissement d'une sphère de métal. L'âge obtenu (75 000 ans) paraît bien faible, mais il est bien plus grand que l'orthodoxie biblique : au milieu du XVII^e siècle, l'évêque Usher calcule que l'homme a été créé le 23 octobre de l'an 4004 avant J.-C. à 9 h du soir.

Un autre point fondamental de la pensée de Buffon est l'irréversibilité des phénomènes dans l'histoire de la Terre. Les roches plutoniques ne se sont formées qu'une fois, tout comme les calcaires, les roches volcaniques, etc.

3. LES NEPTUNIENS

On trouve chez l'Allemand Abraham Werner (1749-1817) deux éléments marquants : le neptunisme et la géognosie. Le *neptunisme*, nommé d'après Neptune, dieu de la mer, postule que tous les matériaux de la croûte terrestre se sont formés par précipitation ou accumulation au fond des océans. La *géognosie* est une méthode de travail qui influencera beaucoup la géologie moderne : un souci de classer et de nommer les terrains d'après leur ordre de superposition et une affirmation que cet ordre correspond à leur âge relatif.

Werner subdivise donc les montagnes en douze formations qui commencent par le Dévonien (cf. Fig. X.8), se poursuivent par le Zechstein, le Trias et se terminent par des couches où l'on trouve des basaltes et autres roches volcaniques qu'il croit sédimentaires, et enfin par la craie.

L'ambition de Werner est de mettre ainsi en évidence une *colonne lithologique universelle*. Cette ambition va buter contre un problème grave, c'est qu'une époque ne peut être caractérisée par un dépôt donné, unique, ou en d'autres termes, qu'on ne peut dater relativement les couches qu'au moyen des fossiles et non en fonction de leur lithologie (cf. Chapitre X, § 1.2).

Comment Werner ne s'est-il pas rendu compte de ce qui nous semble actuellement une évidence ? En fait, Werner et tous les neptuniens tiennent pour avéré l'irréversibilité des phénomènes géologiques et postulent que l'ordre de précipitation des matériaux de l'océan primitif n'est pas quelconque : les premiers dépôts, disent-ils, sont faits de cristaux transparents et de grande taille (ce sont les granites). Puis, à mesure que les eaux sont plus agitées, les cristaux deviennent plus petits et plus confus, noyés dans un tissu lâche opaque. Par ailleurs, les eaux marines s'abaissent progressivement (par évaporation, suivant Werner) et les dépôts anciens les plus élevés, sédimentés au sommet de bosses du globe primitif, commencent à émerger. Ils fournissent des dépôts mécaniques qui se joignent aux précipités chimiques primordiaux et les souillent : les granites cristallins sont remplacés par des grès et des conglomérats.

Remarquons aussi que les neptuniens rejettent ce qu'on appellera le principe des causes réelles (expliquer la nature ancienne par l'observation de la nature actuelle, cf. § 6) : « *Le résidu du liquide primordial qui est la mer ne produit plus de couches minérales* » (Jean-André Deluc, 1727-1817).

4. LES PLUTONIENS

On oppose en général la théorie neptunienne aux idées des *plutoniens*. L'Écossais James Hutton (1726-1797) est le plus célèbre représentant de cette école. Son système, publié dans *Theory of the Earth* (1795), est basé sur l'action du feu ou de la chaleur souterraine auquel il attribue trois effets :

- (1) l'induration des sédiments ;
- (2) le soulèvement des couches et la formation des montagnes ;
- (3) l'injection de granite fondu dans les roches.

On peut dire que concernant le problème de l'induration des sédiments (c.-à-d. la diagenèse, cf. Chapitre VI, § 2.5), les neptuniens étaient plus près de la réalité que les plutoniens. On sait actuellement que la diagenèse est un phénomène de précipitation de matériaux dissous dans des conditions de faibles pressions et températures. Mais les propositions suivantes (2 et 3) sont franchement novatrices. A l'appui de la deuxième hypothèse, Hutton décrit et interprète les *discordances angulaires* comme résultant de l'érosion d'un terrain plissé et son recouvrement par des couches plus jeunes (Fig. II.2).

Les discordances deviennent donc avec Hutton un moyen de reconnaître et dater les mouvements orogéniques à l'origine de la formation des montagnes.

Quant à l'injection de granite à l'état fondu, ses observations en Ecosse le prouvent de manière irrévocable, réfutant l'origine aqueuse. Bien plus, ses données montrent aussi que le granite n'est pas primordial mais postérieur aux couches dans lesquels il est injecté :

« *Granite, which has been hitherto considered by naturalists as being the original or primitive part of the Earth, is now found to be posterior to the alpine schistus ; which schistus, being stratified is not itself original* ». Observations on Granite (1794).

Un dernier élément important est l'apparition avec Hutton de la notion de *cycle* : l'histoire de la Terre repose sur la répétition de cycles de formation de montagnes.

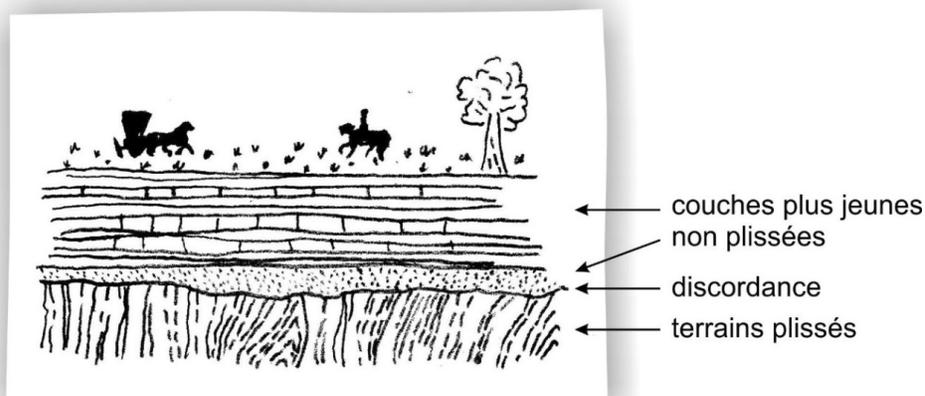


Figure II.2 : une discordance angulaire d'après Hutton (1795). Voir aussi Fig. X.5B.

5. L'ESSOR DE LA STRATIGRAPHIE

Si la géognosie permettait de préciser l'ordre de succession des couches et si des observations faites par Jean-André Deluc sur la présence de faunes différentes dans des couches d'âge différent ont permis d'amorcer l'usage de la paléontologie stratigraphique, il manquait encore des règles pour déterminer l'âge des couches par l'observation des fossiles organiques. C'est aux Français Georges Cuvier (1769-1832) et Alexandre Brongniart (1770-1847) que l'on doit un pas décisif dans cette direction.

Dans *l'Essai sur la géographie minéralogique des environs de Paris* (1811), les deux naturalistes constatent que les couches successives s'individualisent par leur nature et

« surtout par les fossiles qu'on y trouve ». Ceci montre l'importance naissante des fossiles. Plus tard (1821), Brongniart montre que des terrains crétacés de France et de Pologne possèdent les mêmes fossiles alors que les terrains de Pologne sont classés par les werneriens dans le Primaire sur base de la lithologie. Cela l'amène à poser une question essentielle : quand la nature de la roche et son contenu fossilifère sont en désaccord, lequel est le plus fiable ?

La théorie de Werner suppose une cristallisation universelle, de moins en moins crédible, car les observations de la nature actuelle montrent que les dépôts sont différents d'un lieu à l'autre. Adieu donc à la colonne lithologique globale. Mais pour autant, l'usage des fossiles pose question, car la nature ne montre pas non plus les mêmes faunes et flores partout.

Cuvier résout le problème en supposant des *révolutions* (*Discours sur les révolutions de la surface du globe*, 1825). Ces révolutions seraient la conséquence de catastrophes (Cuvier pense aux récentes observations de mammoths pris dans la glace). Reste l'explication de la réapparition de la nouvelle faune après la catastrophe : Cuvier imagine qu'elle était déjà présente ailleurs sur la Terre et qu'elle migre pour envahir de nouveaux territoires, avec le corollaire gênant de l'absence de liaison d'une faune à son époque. En fait, les successeurs de Cuvier ont préféré supposer que la disparition des espèces était globale et était suivie d'une nouvelle création.

Alcide d'Orbigny (1802-1857), père des *étages géologiques* (cf. Chapitre X, § 1.3), admet par exemple la création successive des espèces à chaque époque géologique. Cuvier lui-même, qui avait constaté que les couches les plus anciennes renfermaient des invertébrés, ensuite des quadrupèdes ovipares et seulement après des mammifères, distinguait des périodes bien distinctes, en flagrante contradiction avec son idée des migrations. Il ne tenait cependant pas à s'avancer outre mesure dans cette direction, compte tenu des énormes implications philosophico-théologiques qu'il souhaitait éviter. Il faut ajouter que l'idée même de ces créations à répétition mettait mal à l'aise tant les non-croyants qui n'acceptaient pas ces actes divins, que les croyants qui avaient du mal à voir Dieu s'y prendre à plusieurs fois.

6. L'ACTUALISME

Né en Ecosse, Charles Lyell (1797-1875) est considéré comme l'un des pères fondateurs de la sédimentologie. C'est en particulier par son *principe des causes actuelles* (*Principles of Geology*, 1834), ou plutôt des *causes réelles*, selon la traduction correcte du terme anglais *actual*, qu'il a acquis cette réputation. Ce principe postule que *les causes des changements géologiques n'ont jamais été autres que celles qui se manifestent de nos jours et qu'elles ne se sont jamais manifestées avec une intensité plus grande* ; c'est donc l'exact contrepied de Cuvier. Il devient dès lors possible d'expliquer la genèse des dépôts par une comparaison avec la nature actuelle : un champ énorme s'ouvre ainsi à la recherche.

Ajoutons que Lyell était aussi persuadé de la grande étendue des temps géologiques : il avait observé des dépôts feuilletés et avait attribué leur régularité à un cycle annuel, ce qui exigeait des centaines de milliers d'années pour déposer l'ensemble de la formation. Dans le domaine paléontologique, il croyait à un renouvellement graduel des espèces. Parallèlement, Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829) concevra la notion d'évolution à

laquelle Charles Darwin (1809-1882) donnera un cadre définitif dans son magistral travail sur l'origine des espèces.

7. LA FORMATION DES MONTAGNES

L'Autrichien Eduard Suess (1831-1914) fait partie d'une nouvelle génération de géologues qui vont concilier l'*actualisme* et le *catastrophisme* en montrant qu'à côté des changements et des événements réguliers, des phénomènes rares et plus violents sont aussi consignés dans l'enregistrement géologique (*Das Antlitz der Erde*, 1883-1909). Ses efforts le portent vers l'explication de la formation des chaînes de montagnes par des mouvements verticaux et également tangentiels (il développe le concept de *nappe de charriage*, Fig. VIII.18), dus à un refroidissement progressif de la Terre. Ainsi, il démontre que l'Europe s'est constituée suite à une série d'orogènes successives.

Marcel Bertrand (1847-1907) précise l'hypothèse de Suess et montre que les continents nord-américain et européen ont subi trois phases successives de plissement, chacune agrandissant à tour de rôle par la bordure, un socle encore plus ancien (il s'agit bien de nos orogènes calédonienne, varisque et alpine, cf. Chapitre X).

Suess est également l'auteur du modèle synthétique d'une Terre en plusieurs couches : un noyau de fer et nickel qu'il appelle *nife*, un manteau silico-magnésien qu'il nomme *sima* et une croûte alumino-siliceuse, le *sial*.

D'autres progrès techniques viennent ouvrir le champ des recherches en géologie au début du XX^e siècle : ce sont le développement de l'analyse des roches en lames minces par Henry Clifton Sorby (1826-1908) et la généralisation des analyses chimiques. Mais à côté de ces perfectionnements et enrichissements, une véritable révolution se prépare qui va bouleverser les Sciences de la Terre.

8. DERIVE CONTINENTALE ET TECTONIQUE DES PLAQUES

Il s'agit là d'une rupture considérable dans l'histoire de la géologie. Elle est d'autant plus intéressante qu'elle s'est produite au cours du siècle précédent et que plusieurs de ses acteurs sont encore en vie. Nous allons nous y attarder quelque peu.

8.1. Les précurseurs

S'il est indéniable qu'Alfred Wegener (1880-1930) est le véritable auteur de la théorie de la dérive continentale, il n'en est pas moins vrai qu'il a eu plusieurs prédécesseurs.

- On trouve la première allusion à une séparation des continents bordant l'Atlantique dans un ouvrage d'Antonio Snider-Pellegrini (*La création et ses mystères dévoilés*, 1858). Snider-Pellegrini est un partisan des théories catastrophistes selon lesquelles les continents se sont formés d'un seul côté de la planète lors de son refroidissement et ont migré à leur place actuelle après le Déluge. Il en donne pour preuve la similitude des côtes d'Afrique et d'Amérique du Sud (Fig. II.3A).