

Une brève histoire de la géologie



Table des matières

- [Introduction](#)
- [Une perspective historique](#)
 - [Sténon et les bases de la géologie](#)
 - [Buffon et l'histoire du monde](#)
 - [Werner et le neptunisme](#)
 - [Hutton et les plutonistes](#)
 - [Cuvier et Brongniart et la paléontologie stratigraphique](#)
 - [Lyell et l'actualisme](#)
 - [Suess, Bertrand et la formation des montagnes](#)
 - [De la dérive des continents à la tectonique des plaques](#)
- [La tectonique des plaques](#)
 - [Le mouvement des plaques](#)

Introduction

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 forment 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 (études 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 "πετρον") 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 débris d'animaux ou de végétaux. La paléontologie décrit ces restes fossiles et recherche leur filiation avec les organismes

actuels de manière à fixer les étapes de l'évolution du monde organique.

La géologie quant à elle a pour but de retracer l'évolution de la Terre depuis les temps les plus reculés où nous puissions remonter jusqu'à l'époque actuelle. Cette étude se fonde avant tout 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:

- la connaissance des matériaux de l'écorce terrestre par le biais de la minéralogie et de la pétrographie;
- 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 les phénomènes d'érosion et de sédimentation et une géodynamique interne qui s'attache à l'étude des processus qui sont à l'origine des reliefs (volcanisme, 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.
- la détermination de la succession des événements, enregistrés dans les roches, 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.

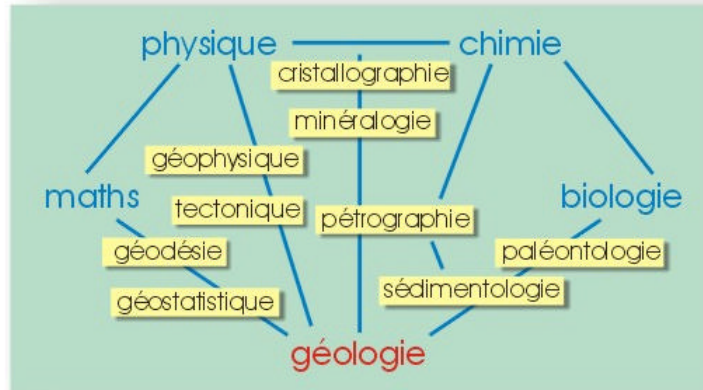


Fig. 1: diversité des sciences de la Terre et relations avec d'autres disciplines.

Ce rapide survol de la diversité des sciences de la Terre en général et de la géologie en particulier nous 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. 1).

Une perspective historique

STENON ET LES BASES DE LA GEOLOGIE

Bien que nombre d'aspects de ce que nous appelons aujourd'hui géologie ait 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 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" de 1669. Dans cet ouvrage au titre particulièrement obscur (pour nous), après avoir démontré que les coquilles fossiles et autres débris sont des restes d'anciens organismes vivants, il infère que les terrains qui les contiennent se sont déposés au fond des eaux (ce qui avait déjà été compris par Léonard de Vinci) 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, p. 30, 1669).

Il s'agit bel et bien du principe fondateur de la stratigraphie: le principe de continuité des couches ou de superposition, impliquant que toute couche géologique est plus récente que celle qu'elle surmonte. Un second principe énoncé par Sténon est tout aussi simple 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, pp. 30-31, 1669).

En d'autres termes, l'inclinaison des couches témoigne de leur déformation: c'est le principe fondateur de la tectonique. Sténon applique ce principe à la formation des chaînes de montagnes, en commentant 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. L'originalité de Sténon par rapport à ses prédécesseurs vient aussi de sa démarche naturaliste: ses principes sont appuyés non sur une réflexion philosophique mais sur des observations de terrain.

BUFFON ET 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 (Lehmann et de Maillet pour ne citer que ces deux auteurs). Ce principe, 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 aux montagnes les plus anciennes une origine ignée. Le globe est passé par un état fondu, puis le 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 histoire du monde en sept époques dont voici un résumé:

- 1. 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);
- 2. la Terre se consolide en une grande masse vitreuse, que l'on retrouve dans le "noyau des grandes montagnes", sortes de "boursofflures";
- 3. les eaux couvrent les continents; toute l'histoire sédimentaire est contractée en une seule époque; apparition des animaux à coquille dont le squelette forme le calcaire;
- 4. les eaux se retirent, provoquant le creusement des vallées; début du volcanisme;
- 5. les éléphants et autres animaux du midi habitent dans les terres du nord, encore chaudes, qui ont été les premières fécondes;
- 6. séparation des continents; effondrement de l'Atlantide, apparition des hommes. Poursuite du refroidissement, naissance des rennes; les glaces alpines gagnent du terrain;
- 7. 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 XVIIe siècle, l'évêque Usher calcule que l'homme a été créé le 23 octobre de l'an 4004 avant J-C à 9h du soir).

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

WERNER ET LE NEPTUNISME

On trouve chez l'Allemand Abraham Werner (1749-1817) deux éléments marquants: le neptunisme et la géognosie. 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 à couches en douze formations qui commencent par notre Dévonien, se continuent par le Zechstein, le Trias et se terminent par des couches englobant des basaltes et autres roches volcaniques qu'il croit sédimentaires, et enfin par la craie. L'ambition de Werner est de mettre 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'autre terme, qu'on ne peut dater relativement les couches qu'au moyen des fossiles, et non en fonction de la lithologie). 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 des précipitations des matériaux de l'océan primitif n'est pas quelconque: les premiers dépôts, disent-ils, sont faits de cristaux transparents et de grande taille (=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 primitifs 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"): "Le résidu du liquide primordial qui est la mer ne produit plus de couches minérales" (J.A. Deluc).

HUTTON ET LES PLUTONISTES

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

- la consolidation des sédiments;
- le soulèvement des strates et la formation des montagnes;
- l'injection de granite à l'état liquide dans les couches.

On peut dire que sur le problème de la consolidation des sédiments (= la diagenèse), les neptuniens étaient plus près de la réalité que les plutonistes. On sait actuellement que la diagenèse est un phénomène de précipitation de matériaux dissous dans des conditions de faibles pression et température. Mais les deux propositions suivantes sont franchement novatrices. A l'appui de la seconde hypothèse, Hutton décrit et interprète les discordances angulaires comme résultant de l'érosion d'un terrain plissé et son recouvrement par des strates plus jeunes (fig. 2). Les discordances deviennent donc avec Hutton un moyen de reconnaître et dater les mouvements orogéniques. 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, ces observations 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.

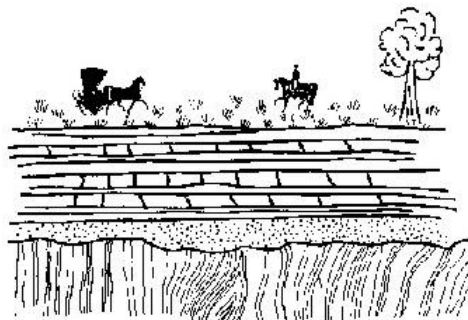


Fig. 2: une discordance angulaire d'après Hutton (1795).

CUVIER & BRONGNIART ET LA PALEONTOLOGIE STRATIGRAPHIQUE

Si la géognosie permettait de préciser l'ordre de succession des couches et si des observations intéressantes faites par 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 à 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 diffèrent par leur nature et "surtout par les fossiles qu'on y trouve". Ce "surtout" montre l'importance naissante des fossiles. Plus tard (1821), Brongniart montre que des terrains créacés de France et de Pologne possèdent les mêmes fossiles alors que les terrains de Pologne sont classés par les Wernerien dans le Primaire sur base de la lithologie. Cela l'amène à poser une question essentielle: quand le critère lithologique et le critère paléontologique 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 varient d'un lieu à l'autre. Adieu donc à la "colonne lithologique globale". Mais pour autant, l'usage des fossiles pose un problème, car la nature ne montre pas non plus une identité de faune sur tout le globe. 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 mammouths pris dans la glace). Reste l'explication de la réapparition de la nouvelle faune après la catastrophe: Cuvier suppose 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. C'est pourquoi les successeurs de Cuvier ont préféré imaginer que la destruction des espèces était générale et qu'elle était suivie d'une nouvelle création. d'Orbigny (1802-1857), créateur des "Etages", admet par exemple la création successive des espèces à chaque époque géologique. En fait, Cuvier lui-même distinguait plusieurs époques successives, ce qui contredit sa thèse des migrations et montre qu'il ne s'en contentait pas, mais voulait rester prudent compte tenu des énormes implications philosophico-théologiques qu'il tenait à éviter. Les terrains les plus anciens renferment des invertébrés, viennent ensuite les quadrupèdes ovipares, puis les mammifères. Il faut ajouter que l'idée même de ces créations dérangeait tout le monde: les incroyants qui n'acceptaient pas ces actes divins, mais aussi les croyants qui avaient du mal à voir Dieu s'y reprenant à plusieurs fois.

LYELL ET L'ACTUALISME

Né en Ecosse, Charles Lyell (1797-1875) est considéré comme un des pères fondateurs de la sédimentologie. C'est en grande part la conséquence de l'élaboration de son "principe des causes actuelles" ou plutôt "des causes réelles" selon la traduction correcte du terme anglais "actual" ("Principles of Geology", 1834). 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 l'exact contrepied de Cuvier. Il devient donc possible d'expliquer la genèse des dépôts par une comparaison avec la nature actuelle: c'est un champ énorme qui s'ouvre à la recherche. Précisons 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) et que dans le domaine paléontologique, il croyait à un renouvellement graduel des espèces. Lamarck (1744-1829) concevra la notion d'évolution à laquelle Darwin (1809-1882) donnera un cadre définitif dans son magistral travail sur l'origine des espèces.

SUESS, BERTRAND ET 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 mouvements réguliers, des phénomènes exceptionnels et plus violents construisent la face du globe ("Das Antlitz der Erde", 1883-1909). Ses efforts le portent vers l'explication de la formation des chaînes de montagne par des mouvements verticaux et également tangentiels (il développe le concept de nappe de charriage), dus à un refroidissement progressif de la Terre. Ainsi, il imagine que l'Europe s'est formée 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 sont formés de trois plissements successifs situés sur la bordure sud d'un vieux continent qu'ils ont agrandi progressivement (il s'agit bien de nos orogènes calédonienne, hercynienne et alpine).

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 XXe siècle: ce sont le développement de l'analyse des roches en lames minces par 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 la physionomie des sciences de la Terre.



Fig. 3: Figures marquantes de l'histoire des sciences de la Terre: de gauche à droite et de haut en bas: Sténon, Buffon, Werner, Hutton, Cuvier, Brongniart, Lyell, Suess et Wegener.

DE LA DERIVE DES CONTINENTS A LA 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.

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 quelques prédécesseurs.

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



Fig. 4: Reconstitution du continent primitif "d'avant le déluge" d'après Snider-Pellegrini.

- Darwin émet l'idée en 1879 d'un mouvement latéral des continents et d'un morcellement de la croûte après son refroidissement. L'extraordinaire quantité d'énergie nécessaire à ce déplacement proviendrait de l'arrachement, dans la région du futur océan Pacifique, d'un énorme morceau de croûte terrestre qui devait donner naissance à la Lune. Cette idée persiste jusqu'au début du XXe siècle.
- Fisher est le premier à faire mention, dans son traité "Physics of the Earth's Crust" de l'existence supposée de courants de convection dans l'intérieur de la Terre. Ces courants, ascendants sous les océans et descendants sous les continents seraient les moteurs de la dérive des continents.
- La première hypothèse cohérente de la dérive des continents est formulée par l'Américain F.B. Taylor. Dans un long article publié en 1910, il essaie d'expliquer l'orogénèse. Selon lui, l'hypothèse de la contraction de la Terre ne suffit pas à expliquer de manière satisfaisante la répartition et la jeunesse de certaines chaînes de montagnes. Il propose une sorte de fluage de la croûte terrestre depuis le nord jusqu'au sud de l'Asie. Ces mouvements auraient créé l'Himalaya et le Pamir en se heurtant à la péninsule indienne. A l'est, les chaînes plissées auraient pu descendre librement jusqu'en Malaisie et en Indonésie. Les chaînes d'Europe, orientées de façon plus complexe, seraient expliquées par l'exigüité du territoire, la présence de montagnes anciennes et par des poussées tangentiellles venues de l'est et du bloc africain. Au sujet de la dorsale médio-atlantique, Taylor pense y trouver la ligne de rupture entre l'Afrique et l'Amérique du Sud. Contrairement à Wegener, Taylor n'apporte pas de preuves à son hypothèse: ceci explique, au moins partiellement, le peu de retentissement de sa théorie.

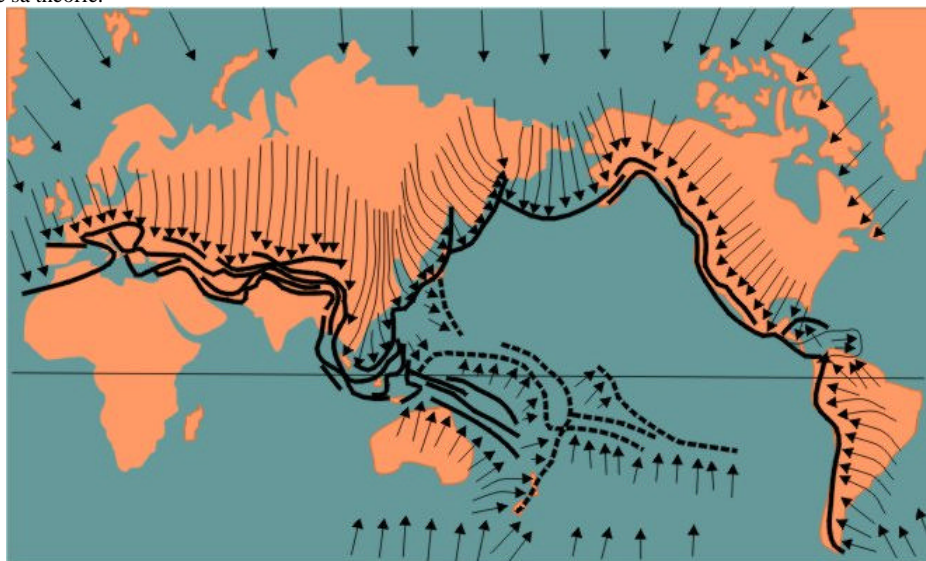


Fig. 5: "Fluage des continents" d'après Taylor; en traits épais, les principales zones de déformation.

Wegener et la dérive des continents

La formulation de la première version scientifique de la dérive des continents lui est due. C'est dit-on en 1910 que, frappé par la ressemblance des contours côtiers de l'Afrique et de l'Amérique du Sud, il conçoit l'idée d'un déplacement des continents. Par la suite, il cherche des arguments aussi bien géologiques que paléoclimatiques (n'oublions pas que Wegener est météorologiste de formation) pouvant étayer sa théorie. Il expose ce qu'il appelle son "hypothèse de travail" dans un livre publié en 1915: "Die Entstehung der Kontinent und Ozeane" et qui connaît de nombreuses rééditions revues et corrigées successivement en 1920, 1922 et 1929. Il entreprend également de souligner les insuffisances et les contradictions de la géologie traditionnelle. En effet, le vieux modèle d'une Terre en contraction est critiquable à plusieurs égards:

- l'ampleur de certains plissements nécessiterait des forces de contraction fantastiques;
- puisque la contraction de la Terre doit se faire de manière sensiblement uniforme, pourquoi les montagnes ne sont-elles pas réparties uniformément sur sa surface et se trouvent-elles concentrées en des zones relativement restreintes?
- de plus, les découvertes de l'époque sur la radioactivité des roches semblent suggérer que les pertes thermiques par rayonnement dans l'espace peuvent être compensées par l'échauffement des matériaux radioactifs;
- Wegener refuse aussi le principe des océans et continents interchangeables par effondrements et transgressions. Il souligne en effet que la majeure partie des roches d'origine marine observées sur les continents sont issues de sédiments peu profonds et non de sédiments océaniques. Les continents doivent donc être permanents, tout comme les bassins océaniques.

Wegener fournit également une impressionnante série de données susceptible d'étayer sa proposition.

Des arguments géophysiques:

- après avoir examiné statistiquement les altitudes de la surface terrestre, on s'est rendu compte que celles-ci étaient réparties en deux gammes d'altitudes principales (fig. 6), correspondant parfaitement aux deux couches présumées, Sial, formant les continents et Sima, le fond des océans. Ceci cadre parfaitement avec les hypothèses mobilistes de Wegener, et est parfaitement incompatible avec l'idée d'effondrements et de soulèvements à partir d'une altitude primitive uniforme des partisans de la Terre en contraction;

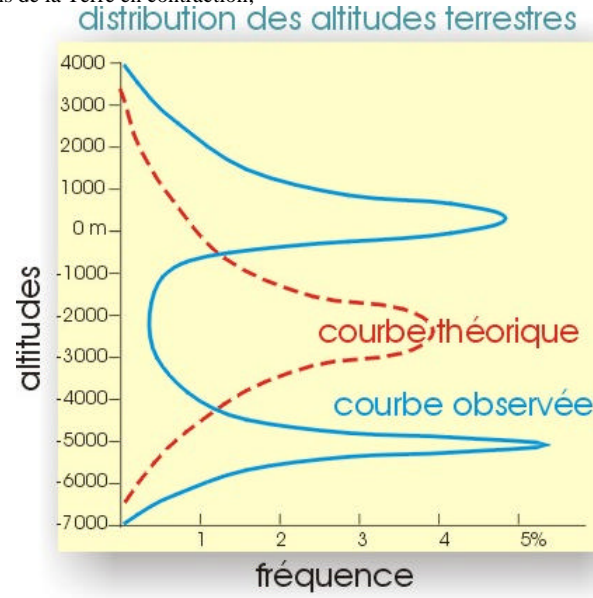


Fig. 6: distribution de l'altitude des continents et des océans.

- Wegener s'appuie également sur la théorie de l'isostasie pour affirmer que si les continents peuvent se mouvoir verticalement, rien ne les empêche de se mouvoir horizontalement, à condition qu'interviennent des forces suffisantes;
- des mesures géodésiques semblent indiquer une dérive du Groenland vers l'ouest par rapport à l'Europe (mesures obtenues par positionnement astronomique ou par différence des temps de transmission radio. En fait, on se rendra compte plus tard que ces mesures étaient fausses).

Des arguments géologiques, complétant la similitudes des côtes africaines et sud-américaines :

- la chaîne plissée du Cap en Afrique semble se prolonger en Amérique, au niveau de l'Argentine;
- le vieux plateau de gneiss africain offre une grande ressemblance avec celui du Brésil;
- il existe des similitudes entre les couches qui datent du début du Mésozoïque de part et d'autre de l'Atlantique Sud (époque du début de l'ouverture de l'Atlantique);
- dans l'Atlantique Nord, les chaînes calédoniennes et hercyniennes européennes se prolongent à Terre-Neuve et en Nouvelle-Ecosse.

Des arguments paléontologiques, justifiant son hypothèse de la "Pangée". En effet, les paléontologues étaient obligés de supposer l'existence de "ponts continentaux" pour expliquer la similitude entre la faune et la flore de certaines parties du monde. Ces ponts se seraient effondrés dans les océans après le Crétacé. La géologie traditionnelle envisageait l'existence de quatre passages: Brésil-Afrique, Australie-Inde et Afrique, Afrique du Sud-Madagascar et Inde, Europe-Amérique du Nord. Le premier pont par exemple était attesté par la présence dans ces deux régions d'un petit reptile terrestre (Mesosaurus). La répartition d'autres espèces à faible potentiel de déplacement (vers, espèces cavernicoles) servait également à attester la présence des ponts et du même coup à appuyer la dérive continentale.

Des arguments paléoclimatiques (moraines, évaporites, calcaires, charbon,...) permettent à Wegener de démontrer d'importants changements dans la disposition des continents par rapport aux pôles et à l'équateur:

- Entre le Carbonifère et l'époque actuelle, l'Europe passe d'un climat équatorial à un climat tempéré, le Spitzberg d'un climat tropical à un climat polaire, l'Afrique du Sud d'un climat polaire à un climat subtropical;
- On a établi l'existence d'une calotte glaciaire dans différentes parties de la Pangée: en Amérique du Sud, en Afrique du Sud, aux Indes et en Australie (fig. 7).

L'originalité de Wegener tient donc dans sa double démarche de critique des modèles statiques et de justification "tout azimut" de son hypothèse. Cependant, il ne s'étend pas sur les causes de la dérive des continents, ce qui déforcera sa position. Il suggère seulement que le mouvement des continents vers l'équateur pourrait être dû à un effet gravitationnel lié à la forme aplatie de la Terre aux pôles et leur mouvement vers l'ouest à la force des marées. Remarquons que Wegener ne reprend pas la théorie des mouvements de convection dans le manteau émise par Fisher.

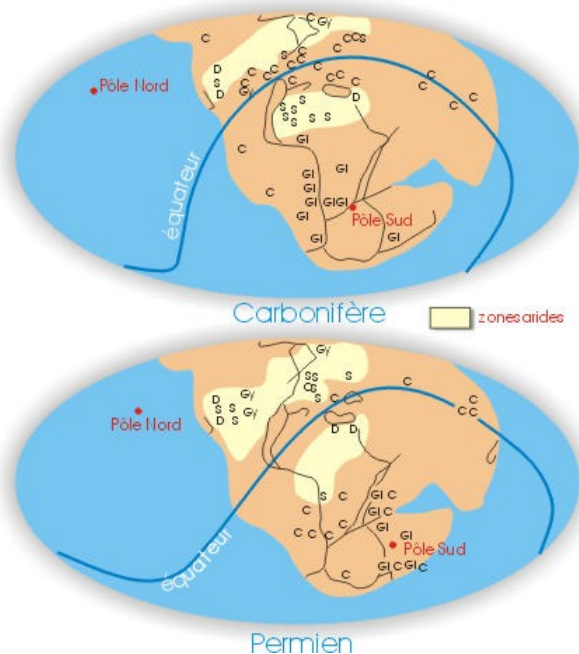


Fig. 7: Les zones climatiques du Carbonifère et du Permien, d'après Wegener (1929). C=charbon, Gl=glace; D=grès désertiques; S= sel; Gy= gypse.

Les idées de Wegener ont été accueillies généralement avec hostilité. Ses détracteurs mettaient en évidence les problèmes suivants:

- pourquoi un continent géant comme la Pangée est-il resté d'un seul tenant pour se morceler ensuite en peu de temps (eut égard à la durée des temps géologiques)?
- comment expliquer l'origine des phases orogéniques anciennes?
- comment une sphère assez résistante pour supporter des dénivellations de l'ordre de 10 km se laisserait-elle déformer de façon importante par des forces aussi minimes que les forces de marée?

La controverse fait fureur et pendant une quinzaine d'années, le monde de la géologie est divisé en partisans et adversaires de la dérive continentale. Après la mort prématurée de Wegener dans une tempête de neige au Groenland, l'idée perd son plus ardent défenseur et la controverse s'atténue considérablement, avant de tomber dans l'oubli.

L'évolution des idées de Wegener

On peut dire que les sciences de la Terre, à l'époque de Wegener, souffrent d'une connaissance insuffisante de l'intérieur du globe (en liaison avec les moyens techniques limités de l'époque) et d'une spécialisation trop poussée (déjà!) des différents chercheurs. De plus, les fonds océaniques sont pratiquement inexplorés (ils ne le deviendront qu'à partir de la 2e guerre mondiale). Ce sont les géophysiciens, à l'intersection de la physique et de la géologie qui mèneront l'offensive contre le concept de l'écorce stationnaire et qui en auront finalement raison. Les idées de Wegener sont reprise et développées par plusieurs chercheurs.

Du Toit et les continents baladeurs

Le géologue Sud-africain Alex Du Toit relance la théorie de la dérive des continents en publiant en 1937 un ouvrage intitulé "Our wandering continents". A la place de la Pangée de Wegener, Du Toit développe l'idée de deux grands blocs continentaux, l'un nordique, la Laurasia et l'autre méridional, le Gondwana (nom d'ailleurs inventé par Suess qui dès 1829 avait émis l'hypothèse que l'Inde, l'Afrique et l'Australie formaient jadis un seul continent dont la partie centrale s'étaient affaissée sous l'océan Indien). Ces deux masses continentales, étaient séparées par un océan, le Téthys, progressivement refermé par la dérive du Gondwana vers la Laurasia. L'Inde, appartenant originellement au Gondwana, s'en serait détachée et aurait heurté l'Asie, créant ainsi l'Himalaya. La fragmentation définitive du Gondwana ne se serait pas accomplie avant le Crétacé, mais sa cohésion aurait diminué dès le Jurassique. L'ouverture de l'Atlantique Sud aurait débuté au nord au début du Crétacé et se serait terminée avant la fin de cette période; l'Inde aurait commencé à dériver vers le début du Crétacé; l'Amérique du Nord vers la fin du Jurassique. Les Alpes auraient été formées par un empilement du Gondwana sur la Laurasia.

Mais Du Toit, pas plus que Wegener, ne réussit à offrir une explication plausible du mécanisme qui commande la dérive des continents, pas plus que de l'origine des forces qui les font se mouvoir.

Holmes, Griggs, Vening Meinesz et les courants de convection

Une tentative pour proposer une explication au moteur de la dérive est faite par Arthur Holmes (1945) qui reprend la vieille idée des courants de convection. Selon lui, la chaleur radioactive accumulée à l'intérieur de la Terre chaufferait le manteau et créerait des courants ascendants. Ce phénomène est détaillé en 1939 par D.T. Griggs qui en décrit les quatre phases: échauffement du manteau pendant environ 25 millions d'années; montée du matériau chauffé vers la surface et descente des roches froides de la croûte; ralentissement du mouvement convectif après environ 10 MA; arrêt du courant, la radioactivité réchauffe les roches froides et la croûte se refroidit progressivement. Holmes a l'intuition que ces courants, s'ils existent, pourraient fragmenter un continent primordial et que ses fragments s'écarteraient jusqu'à ce qu'ils soient entraînés par un courant descendant. Holmes et Griggs supposent que les fosses océaniques pourraient être le lieu où se manifestent ces courants descendants.

Tout ceci s'appuie en fait sur les observations d'un géophysicien hollandais, Felix Vening Meinesz qui a l'idée vers 1923 de mesurer la gravité sous les océans en installant son pendule dans un sous-marin. Contrairement à ce que prévoit la théorie, il constate que la pesanteur est plus faible au niveau des fosses

océaniques, alors que l'on se trouve plus près des roches denses du manteau. Pour expliquer cette anomalie, il suppose que des forces importantes tirent la croûte terrestre légère au sein du manteau.

Ewing, Menard, Bullard et l'exploration des dorsales océaniques

Le géophysicien Maurice Ewing applique vers 1934 les méthodes sismiques à l'exploration des fonds océaniques. Dans sa foulée, la topographie du fond des océans commence à être connue et les dorsales océaniques, ces montagnes sous-marines dont on connaissait vaguement l'existence, deviennent l'objet de l'attention des chercheurs. Henry Menard remarque que la position des dorsales n'est pas fortuite, mais qu'elles sont (sauf dans le Pacifique) situées à mi-distance des continents. Marie Thorp, qui examine des profils des dorsales découvre une mystérieuse dépression, continue tout le long de la dorsale médio-Atlantique. Bruce Meizen et Maurice Ewing constatent que la même dépression suit la crête de la plupart des dorsales du monde.

Sir Edward Bullard mesure le flux de chaleur au milieu de la dorsale médio-Atlantique et constate qu'il est de deux à huit fois plus élevé qu'ailleurs. Par contre, au niveau des fosses océaniques, le flux de chaleur est dix fois moins élevé que la normale.

Dans un autre domaine encore, des données s'accumulent: celui de la magnétisation des roches. Lorsque les laves refroidissent sous le "point de Curie", les particules magnétiques sont figées dans la direction et l'inclinaison du champ magnétique terrestre. Or, ce n'était pas le cas pour toute une série de roches du fond océanique. On pouvait en tirer deux conclusions: ou bien les pôles ne se trouvaient pas au même endroit que maintenant à l'époque de la formation de ces roches, ou bien les roches avaient changé de place par rapport aux pôles actuels. En acceptant la seconde hypothèse, on revenait aux théories de Wegener en leur fournissant des arguments essentiels. Ainsi, vers 1960, les mobilistes se trouvent en présence d'une masse de données nouvelles suggérant une mobilité continentale.

Hess et l'expansion des fonds océaniques

A ces arguments géophysiques, Harry Hess ajoute des observations géologiques: la faible épaisseur des sédiments océaniques: au taux auquel ils se déposent actuellement, la totalité des sédiments océaniques a dû être déposée au cours des derniers 100 MA. Mais cela ne représente que 2% de l'histoire de la Terre. Qu'en est-il des sédiments plus anciens ? Hess constate aussi que l'âge des guyots et des laves augmente en proportion de leur éloignement des dorsales. La situation médiane de la dorsale atlantique n'était donc pas le fruit du hasard et il devenait plausible que l'écartement des deux continents avait commencé à la crête de la dorsale. En appliquant le système des courants de convection à cet ensemble d'observation, Hess est en mesure de proposer l'hypothèse de l'expansion des fonds océaniques.

Presque au même moment (1961-1962), Robert Dietz publie un article contenant des idées très proches de celles de Hess: le fond océanique se crée à l'endroit des dorsales où des courants de convection font remonter du matériel chaud; la nouvelle croûte s'écarte progressivement de part et d'autre de la dorsale et est subductée au niveau des fosses océaniques. Les continents, plus légers, ne disparaîtraient jamais dans le manteau. Hess conclut en insistant sur le fait que les fonds océaniques sont des formations temporaires tandis que les continents sont permanents, bien qu'ils soient perpétuellement morcelés et ressoudés.

Vine, Matthews, Cox, Doell, Dalrymple et les anomalies magnétiques

Ronald Mason est un des premiers à établir une carte des anomalies magnétiques au large de la Californie. Curieusement, ces anomalies se disposaient sous la forme de bandes positives-négatives parallèles aux dorsales (fig. 8). Par la suite, Fred Vine & Drummond Matthews travaillent sur ces anomalies et proposent deux hypothèses:

- la théorie de l'expansion des fonds océaniques est correcte et le fond marin se renouvelle continuellement à l'endroit des dorsales sous-marines;
- il existe une inversion périodique du champ magnétique terrestre.

Ces deux hypothèses leur permettent de proposer un mécanisme par lequel les inversions périodiques du champ magnétique sont enregistrées en bandes successives au fur et à mesure que de nouveaux fonds sont créés au niveau de la dorsale, s'imprègnent de la direction du champ régnant à l'époque et s'écartent de son axe (1963). Trois autres chercheurs, Allan Cox, Richard Doell et Brent Dalrymple datent par la méthode de datation radiométrique K-Ar, des échantillons de laves et constatent que les inversions magnétiques coïncident avec des périodes déterminées de l'histoire de la Terre. Ils établissent ainsi pour les derniers 3,5 MA, l'existence d'au moins neuf inversions du champ magnétique.

Un des résultats du travail de ces chercheurs est un renouvellement de l'intérêt pour l'hypothèse de l'expansion des fonds océaniques et plusieurs scientifiques s'associent à Vine & Matthews pour étudier d'autres profils magnétiques, notamment dans le Pacifique au sud-ouest de l'île de Vancouver. C'est là que la théorie des anomalies magnétiques est soumise à un test sérieux car, dans cette zone, les bandes ne paraissent pas ordonnées ni symétriques. Peu avant, Menard et John Tuzo Wilson avaient découvert que la faille de San-Andreas avait occasionné dans l'océan le hachement de la dorsale qui avait ainsi cessé d'exister en tant que chaîne ininterrompue de montagnes. Les différents secteurs de la dorsale se trouvant déplacés les uns par rapport aux autres, Vine et Wilson localisent ces fragments de dorsale et parviennent à reconstituer le puzzle magnétique déplacé par la faille. De plus, ils montrent, en supposant une vitesse d'expansion de 3 cm par an, que les bandes magnétiques coïncident avec l'échelle des inversions magnétiques de Cox et Dalrymple.

Cette convergence de données est peut-être l'élément qui provoque ensuite un ralliement de la majorité de la communauté scientifique à la nouvelle théorie.

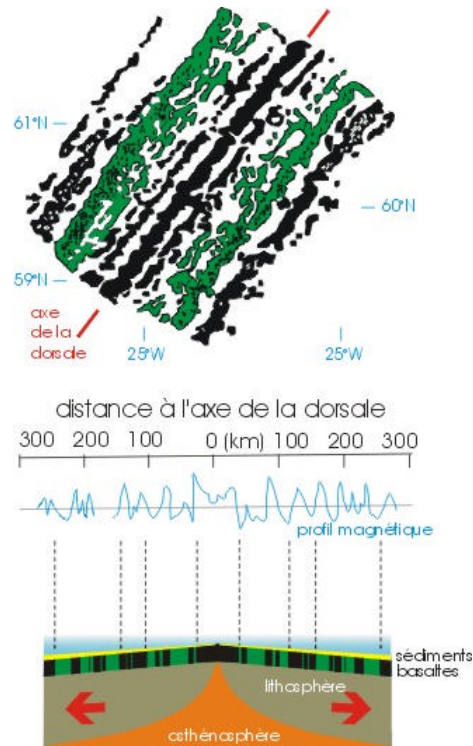


Fig. 8: exemple de carte des anomalies magnétiques de part et d'autre d'une dorsale (en haut) et exemple de profil magnétique avec son interprétation dans le cadre de l'hypothèse de Vine & Matthews.

La tectonique des plaques

Vers la fin des années soixante, la théorie de la tectonique des plaques prend une forme "définitive". Elle est le fruit des travaux que nous avons évoqué et des réflexions de Mc Kenzie & Parker (1967), Morgan (1968) et Le Pichon (1968). Son importance dans les sciences de la Terre est énorme: elle est devenue le cadre conceptuel dans lequel s'inscrivent la plupart des phénomènes géologiques: formation des chaînes de montagne, minéralisations, évolution des marges océaniques, etc.

Plusieurs propositions sous-tendent la théorie:

- une différence rhéologique permet le découplage entre l'asthénosphère et la lithosphère. La lithosphère comprend la croûte et la partie superficielle du manteau; elle est peu déformable et épaisse d'une centaine de km. L'asthénosphère comprend le reste du manteau et est ductile;
- la lithosphère rigide est constituée d'un certain nombre de plaques, mobiles les unes par rapport aux autres et dont les frontières correspondent aux zones sismiques;
- les plaques prennent naissance au niveau des dorsales océaniques et disparaissent par subduction au niveau des plans de Benioff; les failles transformantes sont des frontières où deux plaques se déplacent l'une par rapport à l'autre (fig. 9);
- les plaques sont animées de mouvements horizontaux suite à des phénomènes convectifs affectant le manteau et de mouvements verticaux par réajustement isostatique (disparition de glace, érosion,...)

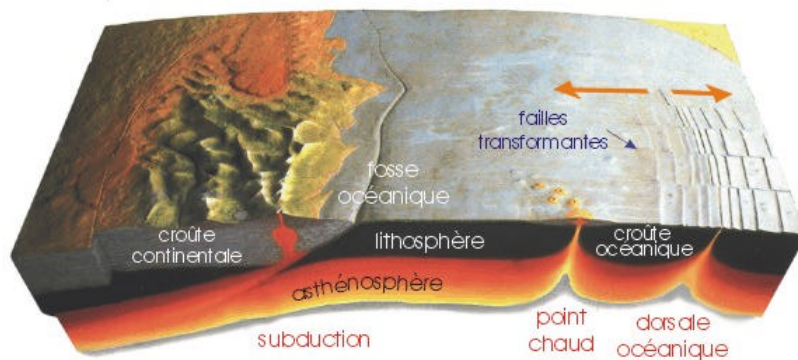


Fig. 9: la tectonique des plaques et ses éléments essentiels.

LE MOUVEMENT DES PLAQUES

La reconstitution du mouvement des plaques dans le passé est devenue rapidement une préoccupation essentielle des chercheurs impliqués dans l'élaboration de l'histoire de la Terre. Cette reconstitution s'appuie sur la juxtaposition des contours des continents, sur l'étude des anomalies magnétiques des fonds océaniques (parallèles aux anciennes dorsales et de largeur proportionnelle à la vitesse de création de la plaque) et sur la géométrie des failles transformantes.

Mouvements relatifs et mouvements absolus

Le mouvement de deux plaques à la surface de la Terre peut être décrit de deux façons: soit à partir d'un repère fixe (mouvement absolu); soit par rapport à un repère lié à l'une des deux plaques (mouvement relatif). Il faut noter que si l'on connaît le mouvement absolu de deux plaques, il est possible de déduire leur mouvement relatif, mais que la connaissance des mouvements relatifs de plusieurs plaques ne permet pas de déduire leur mouvement absolu.

La nature des mouvements à la frontière de deux plaques dépend de la différence de leur vitesse: ainsi, deux plaques peuvent avoir un déplacement absolu dans une même direction, mais si l'une est plus rapide que l'autre, une zone de subduction ou une dorsale peuvent être créées, selon leur disposition. Ceci souligne le fait que les frontières de plaques sont mobiles à la surface de la Terre (à titre d'exemple, la plaque africaine est entourée de dorsales, sauf sur sa bordure nord. Cette plaque s'agrandit donc, et les dorsales qui l'entourent sont nécessairement mobiles).

On utilise en général le référentiel des points chauds pour reconstituer le mouvement absolu des plaques. Les points chauds sont des alignements de volcans, liés à des remontées de matériel chaud d'origine profonde (Hawaii, Réunion, Maldives,...). Ces panaches sont fixes dans un repère lié au globe. La datation radiométrique des laves fournit le calage temporel. A noter que la superposition de points chauds et de dorsales ne sont pas rares: dans l'Atlantique, c'est le cas de l'Islande et des Açores.

Mouvement des plaques sur le globe

Le mouvement des plaques sur le globe peut être décrit comme une suite de rotations autour d'un ou de plusieurs axes eulériens (axes passant par le centre de la Terre). On n'a donc besoin que de la latitude et de la longitude des pôles des axes successifs et des vitesses angulaires de rotation pour reconstituer le mouvement des plaques au cours du temps. Il faut remarquer que si la vitesse angulaire est constante en tout point de la plaque, ce n'est pas le cas de la vitesse linéaire, qui est maximale au niveau de l'équateur eulérien et décroît en direction des pôles eulériens où elle est nulle (donc, par exemple, la vitesse d'accrétion à l'axe d'une dorsale séparant deux plaques varie en fonction de la distance au pôle de la rotation). Un cas particulier est celui de plaques dont l'axe de rotation est externe: dans ce cas, aucun point de la plaque n'a une vitesse nulle (fig. 10).

Pratiquement, la reconstitution s'effectue sur base des cartes des anomalies magnétiques (isochrones). On referme le domaine océanique par étapes successives en amenant en coïncidence les isochrones. L'étude des zones de fracture permet aussi de contraindre la géométrie des déplacements, puisque ce sont des petits cercles centrés sur le pôle eulérien (fig. 10).

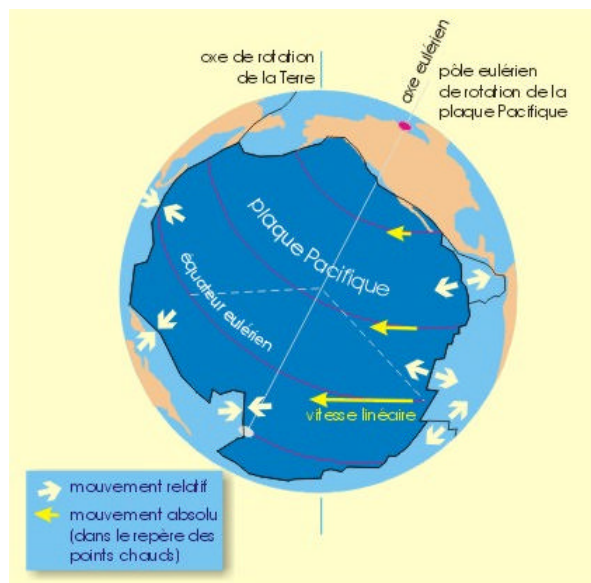


Fig. 10: déplacement de la plaque Pacifique, mouvement absolu, mouvements relatifs. D'après Pomerol et al. (2000).

Les mouvements actuels des plaques

Ces mouvements sont issus de données de géodésie spatiale ou satellitaire. Anciennement, ils étaient estimés sur la base d'une moyenne des déplacements des plaques sur les trois derniers millions d'années. Le modèle actuellement utilisé est un modèle en 16 plaques dû à De Mets et ses collaborateurs (1990) (modèle NUVEL-1, fig. 11). Il s'agit cependant d'un modèle de mouvements relatifs et pour obtenir un modèle absolu, il faut utiliser les points chauds. Actuellement, on utilise en général le modèle de Gripp & Gordon, version "absolue" du modèle NUVEL-1.

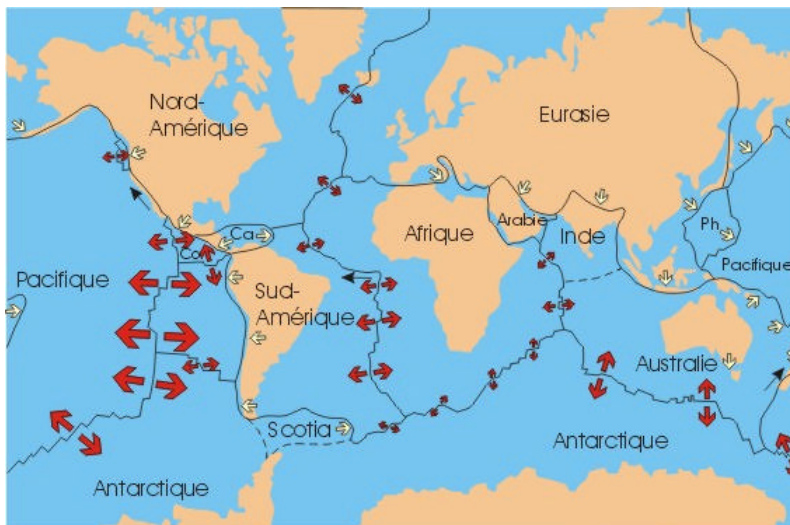


Fig. 11: répartition et mouvement relatif des plaques lithosphériques. Les flèches jaunes soulignent les convergences, les flèches rouges, les divergences et les flèches noires, les coulissages. La longueur des flèches est proportionnelle à la vitesse des plaques. Ph: plaque Philippines; Co: plaque Cocos; Ca: plaque Caraïbes. D'après Pomerol et al. (2000).

L'origine du mouvement des plaques et le cycle de la lithosphère

On associe généralement le mouvement des plaques à un effet d'entraînement par des courants convectifs du manteau terrestre. Un problème se pose néanmoins, c'est l'existence du découplage lithosphère-asthénosphère qui devrait diminuer l'efficacité de cet effet d'entraînement. D'autres forces sont cependant en jeu, dont l'injection de matériel frais au niveau des dorsales qui provoquerait une poussée horizontale des plaques.

A l'échelle de l'histoire de la Terre, la reconstitution du mouvement des plaques donne lieu à des modèles ou cycles, faisant alterner des périodes où les continents sont disloqués et des périodes où les continents sont réunis en une masse super-continentale (Pangée). En effet, on peut considérer que toute ouverture océanique doit être compensée par une convergence (rayon constant de la Terre) et que deux continents séparés par une ouverture océanique fusionneront à nouveau, isolant entre eux un lambeau de lithosphère océanique. Les continents ne pouvant être subductés se rassembleraient ainsi périodiquement dans l'histoire de la Terre. On a donné le nom de "cycle de Wilson" (du nom de Tuzo Wilson dont nous avons parlé plus haut) au cycle démarquant par un nouveau rift, se poursuivant par la création de plaque océanique et la subduction et se terminant par la collision continentale. Un tel cycle pourrait durer de 300 à 500 MA. Le dernier cycle a abouti à la constitution de la Pangée, il y a 280 MA, dont l'éclatement n'est pas encore achevé de nos jours, ce qui se marque dans le visage actuel de notre planète par l'existence d'un "hémisphère continental" et d'un "hémisphère océanique". [Reconstitution du déplacement des masses continentales durant le Paléozoïque et le Mésozoïque.](#)

Pour en savoir plus:

D'un point de vue historique:

- F. Ellenberger, 1994. Histoire de la Géologie (tomes 1 & 2), Lavoisier Technique et Documentation, Paris, 352 & 381 pp. (Ouvrage monumental, référence obligée, avec nombreux extraits des textes anciens);
- G. Gohau, 1987. Histoire de la Géologie, Editions La Découverte, Paris, 259 pp. (Très bon ouvrage également, plus concis et facile à lire que le précédent);
- A. Hallam, 1976. Une révolution dans des sciences de la Terre: de la dérive des continents à la tectonique des plaques. Le Seuil, Paris, 184 pp. (Introduction à l'histoire de la tectonique des plaques).

Des ouvrages de géologie générale:

- C. Pomerol, Y. Lagabrielle & M. Renard, 2000. Eléments de géologie, Dunod, Paris, 746 pp.
- A. Brahic, M. Hoffert, A. Schaaf & M. Tardy, 1999. Sciences de la Terre et de l'Univers, Vuibert, Paris, 634 p

F. Boulvain, 2005

AUTRES COURS EN LIGNE:

[cartographie géologique](#)

[géologie de la Wallonie](#)

[excursions](#)

[processus sédimentaires](#)

[sédimentologie](#)

[compléments de pétrologie sédimentaire](#)

[notes de TP de pétrologie sédimentaire](#)

On consultera également l'excellent cours de géologie de P-A. Bourque:
http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html

[Pétrologie sédimentaire](#) | [Recherche](#) | [Enseignement](#) | [Publications](#) | [Autre chose...](#)

Homepage Université de Liège: <http://www.ulg.ac.be>
Homepage Faculté des Sciences: <http://www.ulg.ac.be/facsc/>
Homepage Géologie: <http://www.ulg.ac.be/geolsed/geologie>

Responsable du site: fboulvain@ulg.ac.be
Date de dernière mise à jour : 15/12/2006
Pétrologie sédimentaire, B20, Université de Liège, B-4000 Liège

Département de Géologie

