

Chaire internationale

M. A.M. Celâl Şengör, professeur

Leçon inaugurale : *L'Histoire d'une science est la science elle-même : le cas de la tectonique* (publiée sous le titre : Une autre histoire de la tectonique)

La leçon inaugurale a eu lieu le jeudi 18 novembre 2004.

Cours : *L'Histoire de la tectonique depuis les temps les plus reculés jusqu'à l'apparition de la tectonique des plaques : une étude épistémologique.*

Première leçon : *La tectonique dans la mythologie : Combien pouvons-nous apprendre de l'âge des dieux et des héros ?*

Qu'est ce que la mythologie ? C'est celle que Mircea Eliade nous avait appris à reconnaître comme une « vérité éternelle » inventée, qui s'était créée dans l'esprit des hommes. Quand tout le reste échoue, les individus inventent des histoires et les considèrent alors comme des vérités révélées, intouchables. *La mythologie parle de l'origine des choses, de l'univers, de l'homme.* Deux contes mythologiques fondamentaux pour la tectonique sont :

- 1) *Le Déluge* (comme précurseur des théories *exogéniques*).
- 2) *Le dieu de la tempête* (comme précurseur des théories *endogéniques*).

1) Le Déluge est l'histoire d'une inondation supposée universelle. Celui-ci est connu de nous sous plusieurs versions. La question fondamentale ici était toujours : quel avait été le mécanisme ?

- Une montée universelle des eaux de la mer ? (Dans ce cas, l'inondation doit être simultanée partout).

- Le soulèvement d'un continent ou d'une autre partie de la terre ferme ? (Dans ce cas, l'inondation doit être locale, à l'échelle de la région montante).

Dans les versions mésopotamiennes, judaïque et dans celle de Deucalion des Grecs, c'est la montée universelle du niveau de la mer qui a été la cause du

Déluge. Plusieurs agents ont été considérés comme les moteurs du désastre : le vent, la pluie et les vagues de la mer. La soi-disant universalité du Déluge est attestée par la prétendue destruction de tous les êtres vivants sauf les voyageurs dans l'arche, mais il y a des complications dans les différentes versions.

Si le Déluge a vraiment été universel, on peut le considérer comme un marqueur global de temps. On trouve plusieurs mentions dans les récits mythologiques des témoins physiques du Déluge, c'est-à-dire d'enregistrements géologiques et géomorphologiques. On sait que dans le développement de la géologie, l'idée du Déluge biblique a joué un rôle principal dans l'explication de l'origine de la topographie actuelle et dans le développement de la stratigraphie. Étonnamment, ce rôle est devenu beaucoup plus important depuis la Renaissance à cause de la plus grande accessibilité de la Sainte Écriture au grand public après la Réforme.

2) Le dieu de la tempête (comme précurseur des théories *endogéniques*)

Dans la plupart des langues des familles sémitiques et indo-européennes, les mots signifiant une *montagne* ou une *proéminence topographique* et ceux signifiant un *taureau* sont les mêmes ! Pourquoi ? Les volcans explosifs avec une caldeira très souvent, (en particulier en Anatolie centrale), et l'aurochs toujours, ont deux cornes, une(des) langue(s) rouge(s)-et-noire(s), une couleur gris-noir, peuvent faire trembler la terre et aussi peuvent souffler violemment. Donc la montagne et l'aurochs sont perçus comme l'apparition de la même divinité, qui peut produire une tempête ! Une diadrachme de l'époque de Caracalla (AD 211-217) montre le mont Argæus (Erciyes) en Turquie centrale avec deux cornes de taureau.

Dans toutes les mythologies du Moyen-Orient et du monde gréco-latin, les montagnes sont considérées comme l'élément instable, imprévisible, capricieux, et l'élément masculin par excellence. En revanche, les plaines sont regardées comme l'élément stable, prévisible, fécond, sûr, et l'élément féminin par excellence.

Rappelons : dans la géologie de notre temps, les montagnes sont les éléments instables de la structure lithosphérique du globe, et les plaines sont, en général, les éléments stables.

Deuxième leçon : La tectonique dans l'antiquité : comment créer une surface labile sur une planète considérée comme morte ?

Quand on sort du domaine de la mythologie dans l'Antiquité, on doit se borner au monde grec pour discuter des questions de nature *scientifique*¹. Donc, dans

1. Suivant Karl R. Popper, je définis la science comme un système de pensée dans lequel les hypothèses sur les choses et les événements, développées de n'importe quelle façon, peuvent être testables par observation.

cette leçon, j'ai parlé seulement des théories tectoniques développées par les penseurs grecs et romains.

Dans le cadre de la définition de la science donnée par Popper, les hypothèses développées par les penseurs grecs de la Grèce continentale, d'Ionie et d'Italie méridionale à partir du 6^e siècle av. J.-C., ont été strictement scientifiques. Cette manière de penser a été introduite par deux hommes de la ville de Milet en Ionie (Turquie du sud-est) : Thalès (*floruit ca. 575 av. J.-C.*) et Anaximandre (*floruit ca. 560 av. J.-C.*). Thalès a été le premier homme à avoir formulé son savoir en généralisations théoriques qui sont testables par observation. Après avoir développé quelques théorèmes géométriques, Thalès a proposé d'approcher les problèmes de la nature avec la même méthode de généralisation. Il a rationalisé le concept sumérien de « tarkullu » dans le cadre de son hypothèse d'un disque terrestre flottant sur les eaux de l'océan. La différence énorme et vitale entre le concept de « tarkullu » et l'hypothèse de Thalès est ce que le premier a été un concept mythologique intouchable ; par contre, le second a pris la forme d'une hypothèse scientifique, offerte libéralement à la critique.

Anaximandre, ami et élève (ou seulement auditeur) de Thalès d'après la tradition doxographique, a relevé le défi et répondu comme suit :

« ...la terre est suspendue, soutenue par rien, mais stable à cause de son égal éloignement de tout. Sa forme est courbée, arrondie à la façon d'une colonne de pierre ; sur l'une nous marchons, mais l'autre se trouve à l'opposé. » (Hyppolite, *Refutatio* : traduction de Marcel Conche, 1991).

Il croyait que nous vivions sur une surface plate de ce cylindre. C'est pourquoi il pensait que ce serait utile de dessiner une carte de cette surface :

« Anaximandre le Milésien, auditeur de Thalès, le premier eut l'audace d'inscrire la terre habitée sur une tablette. Après lui, Hécatee le Milésien, grand voyageur, rendit la carte plus précise, si bien qu'elle devint un objet d'admiration. » (Agathémère, *Géographie*, traduit par Marcel Conche, 1991).

Nous savons aussi, à partir des témoignages des auteurs classiques après lui, qu'il a disserté dans son ouvrage intitulé *Peri fiseos* (Sur la nature) sur les mouvements du niveau de la mer et probablement sur les tremblements de terre. Son interprétation de ces phénomènes, à laquelle l'hypothèse ultérieure de Benoît de Maillet (*Telliamed*, 1748) ressemble, a été entièrement exogénique.

On accuse très souvent les Grecs de ne pas avoir eu une conception linéaire du temps. Pourtant, on peut voir dans le livre d'Anaximandre, qu'il avait une conception linéaire (et infinie !) du temps, dans laquelle il a même pu formuler une théorie du développement de la vie.

Une importante implication tirée par Anaximandre de sa théorie historique de la terre concerne les tremblements de terre : Cicéron (dans son *Sur la Divination*) témoigne de la prédiction, par Anaximandre, d'un tremblement de terre à Sparte (Marcel Conche, 1991). Nous est parvenu le modèle des tremblements de terre

d'Anaximène (*floruit* ca. 546 av. J.-C.), élève d'Anaximandre, selon lequel la terre s'ébranle à cause du dessèchement progressif, avec pour conséquence le coulement de la terre. Il est tout à fait possible que ce modèle ait été celui d'Anaximandre. Il est aussi très probable que ce modèle a été le fondement de l'hypothèse, dite « éponge », de la structure de la terre d'Empédocle (*floruit* ca. 450 av. J.-C.).

Aristote, dans son *De Caelo* avait écrit que les philosophes pythagoriciens d'Italie n'avaient pas placé la terre au centre de l'univers mais un feu central. Ultérieurement, Simplicius l'a critiqué en disant que les mieux informés pensent que le feu se trouve au centre de la terre et pas au centre du Cosmos ! En se basant sur l'observation du volcanisme et de l'aspect perforé de la terre en Italie méridionale (et, peut-être dans d'autres régions méditerranéennes alors connues), Empédocle a développé (ou amélioré) l'idée d'un feu interne qui réside dans les canaux à l'intérieur de la terre. Maintenant la question qui se présente à nous est : qu'est ce qu'Empédocle a imaginé sur les effets du feu souterrain ? D'abord, il croyait que les pierres se forment sous l'action du feu. Empédocle pensait aussi que les irrégularités de la surface de la terre doivent leur existence au feu interne de la terre. Il est donc devenu le fondateur d'une dynamique interne de la terre indépendante du Soleil : « Empédocle pense que ces falaises, ces rocs et ces pierres qui s'offrent à notre vue, se dressent et surgissent grâce au feu qui brûle dans les profondeurs de la terre et qui les a projetés au dehors. » (Plutarque, *De primo frigido*, traduit par Jean Bollack, 1969).

Ces idées d'Empédocle sur les rouages de notre planète ont eu une influence décisive sur les interprétations de la tectonique de la terre jusqu'à la fin du 18^e siècle !

Au temps de la mort de Socrate (399 av. J.-C.), l'idée que la chaleur intérieure de la terre est responsable des mouvements de l'écorce terrestre a été bien respectée à Athènes.

Le meilleur témoignage des vues sur la tectonique de Platon (428/7-348/7 av. J.-C.), élève de Socrate, nous le trouvons dans le dialogue *Phédon* (395-382 av. J.-C.). Là nous avons une théorie générale sur la structure et le comportement structural de la terre qui est très empédoclienne. Pourtant il n'est pas toujours facile d'interpréter les descriptions de Platon dans le cadre d'une image visuelle. Mais la première théorie de la tectonique globale proprement dite a été celle d'Aristote (384-322 av. J.-C.) développée à Assos dans un cadre de la géophysique platonienne.

Pierre Duhem nous a montré que Théophraste (372/369-288-285 av. J.-C.), comme son maître et ami Aristote avant lui, et comme James Hutton, l'un des fondateurs de la géologie moderne pendant le 18^e siècle, niait qu'on pût découvrir des preuves que le monde a commencé et qu'il doit avoir une fin.

Théophraste a répondu contre les argumentations de Zénon, qui niait l'éternité (ou incorruptibilité) du monde. L'argumentation de Théophraste montre une

excellente compréhension de la force des eaux dans la dégradation de la topographie. Dans sa réponse, il souligne aussi l'existence des facteurs internes qui doivent former la topographie de la terre. *C'est précisément la même forme d'argumentation qu'utilisera Hutton, deux millénaires plus tard !*

La question de l'origine de montagnes s'est présentée à Ératosthène (274-194 av. J.-C.) quant à l'origine du Mont Taurus. D'après les discussions dans la *Géographie* de Strabon, nous savons qu'« après avoir dit que la terre dans son ensemble est de forme sphérique, non pas comme un objet fait au tour, mais avec quelques irrégularités » Ératosthène « décrit l'une après l'autre toutes les modifications qui interviennent du fait de l'eau, du feu, des tremblements de terre, des éruptions volcaniques et autres phénomènes du même genre ». Il « vante alors l'opinion de Straton le Physicien et aussi celle de Xanthos de Lydie. D'après Xanthos, il se produisit sous Artaxerxès [roi achéménide de Perse, 464-424 av. J.-C.] une grande sécheresse qui eut pour conséquence de tarir fleuves, lacs et puits ; sachant, par ailleurs qu'en plusieurs endroits, situés à bonne distance de la mer, on trouvait des pétrifications en forme de coquillages ou de pétoncles, des empreintes de valves et de l'eau saumâtre, notamment en Arménie, en Matiène et en basse Phrygie, il en tirait la conviction que ces plaines avaient jadis été occupées par la mer » (Strabon, I, 3. 3, traduction de Germaine Aujac).

Les idées tectoniques de Strabon (Amasya) (64/63 av. J.-C.-23/25 AD) sont en principe les mêmes que celles d'Ératosthène. Il décrit les tremblements de terre, les sources chaudes, l'activité volcanique actuelle *et du passé*, et les changements topographiques associés. Les produits volcaniques ici (les fumerolles) sont décrits par Strabon aussi comme le « plutonium » (Strabon, V. 4. 5). Strabon a expliqué les courants du Bosphore et des Dardanelles avec l'hypothèse d'un soulèvement du fond de la Mer Noire (*Pontus Euxinus*). Après avoir rejeté la possibilité des changements permanents du niveau de la mer à cause d'une augmentation du volume de l'eau, Strabon explique son mécanisme pour les changements du niveau du sol de la mer qui est entièrement aristotélicien. *Avec Strabon nous sommes donc revenus au modèle d'Aristote !*

Pourquoi le Mont Taurus était-il conçu de façon tellement linéaire par les deux grands géographes de l'Antiquité ? Leur grand successeur Alexandre de Humboldt (1769-1859) nous fournit la réponse :

« On se demande d'où les Grecs ont pu tirer une notion en partie très exacte sur la direction continue d'une haute chaîne de montagnes suivant dans sa direction un même parallèle bien au-delà des sources du Gange ? Cette opinion était-elle purement hypothétique et fondée sur une certaine prédilection pour la régularité des formes ? » (de Humboldt, *Asie Centrale*, 1843, t. I, pp.132-133). Nous savons que l'apogée de la géographie antique, Claude Ptolémée d'Alexandrie (90-168 AD), a travaillé dans la même tradition de régularisme.

Quel a été l'état du catastrophisme dans l'Antiquité ?

La plupart des Présocratiques ont été des uniformistes, au moins graduélistes/évolutionnistes dans l'explication de l'histoire de la terre et de la vie (voir l'histoire géologique selon Anaximandre). Les atomistes (les Présocratiques comme Démocrite et les Postsocratiques comme Lucrèce) ont aussi été du même avis. Par contre, la plupart des Postsocratiques à partir de Platon ont été des catastrophistes dans l'explication de l'histoire de la terre et de la vie. Tous les grands géographes de l'antiquité (avec l'exception possible d'Ératosthène) ont été aussi des catastrophistes. (Alors la plus grande catastrophe connue a été la destruction d'Atlantis, qui était considérée comme un événement historique).

Conclusion : Déjà dans l'Antiquité nous pouvons discerner deux manières de voir dans les sciences de la terre, en particulier en tectonique : un groupe des irrégularistes/uniformistes et un autre groupe des régularistes/catastrophistes. Dans le cours de ces leçons, nous pourrions voir que les mêmes groupes garderont leurs identités jusqu'à nos jours !

Troisième leçon : *La tectonique au Moyen Âge : comment utiliser le savoir antique dans un monde dominé par la croyance ?*

Dans cette Leçon je traite presque exclusivement de l'histoire de la tectonique dans les sociétés chrétiennes et musulmanes, parce que des développements majeurs ayant eu une influence sur l'avenir de la tectonique ont eu lieu principalement dans ces sociétés.

La Géographie du Moyen Âge : un indice de la décadence des connaissances sur la Terre.

D'après des documents qui nous sont parvenus, il y a eu deux traditions géographiques différentes dans le monde chrétien jusqu'au septième siècle après la chute de l'Empire de l'Ouest :

1) Une tradition scientifique qui continuait à utiliser le livre de Ptolémée (mais pas exclusivement). Les membres de cette tradition ont été ceux qui ont pu lire le Grec.

2) Une tradition populaire, surtout religieuse (chrétienne), dont la plupart des membres ne savaient pas lire et écrire.

1) Nous savons que le *Guide de Géographie* (Γεωγραφικὴ Ἑπίγειος) de Ptolémée a été traduit en Latin par Boèce (480-524) comme le dit Cassiodore (485 env.-580 env.) dans ses *Variae*. Peu après (au milieu du 7^e siècle), le livre de Ptolémée a disparu jusqu'au huitième siècle, date à laquelle il réapparaît en Orient chez les Arabes (d'après les indications dans le *Mo'djem el-Bouldân* [= Le Dictionnaire des Pays] de Yakoût [1179-1229]) et au treizième siècle chez les Byzantins.

Déjà, avant la chute de l'Empire de l'Ouest, Macrobe a écrit son livre sur son *Commentaire sur le Songe de Scipion* incluant une discussion sur la géographie et le comportement géologique (très générale) en 410 ou peu avant. Le fameux historien de la science médiévale William Harris Stahl nous a montré (1952) que la description de l'Univers et de la Terre que donne Macrobe ressemble à celles de Vitruve (1^{er} s. av. J.-C.), Geminus (1^{er} s. av. J.-C.), Cléomède (1^{er} s. av. J.-C.), Théon de Smyrne (c'est-à-dire, d'Izmir : 1^{re} s. AD), Chalcidius (4^e s. AD), Martianus Capella (4^e ou 5^e s. AD) et Isidore de Séville (560-636). Mais il souligne aussi qu'il est tout à fait possible qu'aucun de ces auteurs n'ait été parmi les sources de Macrobe. Donc nous savons seulement que Macrobe se trouvait dans la même tradition « scientifique » que ces auteurs.

Quelle a été la pensée « géologique » de la tradition scientifique jusqu'au septième siècle ? On peut montrer, dans la tradition scientifique de la science de la terre du début du Moyen Âge, que la pensée *empédoclienne/platonicienne/aristotélicienne* n'a jamais disparu. Cette manière de penser passera sans aucune lacune, plus tard, d'abord au Moyen Âge tardif et, après, à la Renaissance et à l'époque Baroque, comme nous le verrons.

2) Retournons à la tradition populaire, surtout religieuse, du début du Moyen Âge.

En géographie, *Cosmas Indicopleustes* (Cosmas le voyageur de l'Inde) du sixième siècle représente un cas extrême de la décadence des connaissances sur la terre : il voyait dans la Révélation le seul moyen de connaissance. Il rejetait la sphéricité de la terre, l'histoire géologique et toute explication rationnelle des phénomènes géologiques comme les tremblements de terre.

On pense maintenant que la simplicité apparente de documents cartographiques du Moyen Âge européen a plutôt été l'expression d'un manque d'intérêt pour la nature extérieure que celle d'un manque de connaissances. La plupart des représentations cartographiques du monde pendant la période entre la chute de l'Empire d'Occident et la Renaissance du douzième siècle, qui ont été conservées jusqu'à nous, se sont bornées à l'illustration des textes religieux.

Quelle a été la pensée « géologique » de la tradition populaire jusqu'au douzième siècle ?

Dans les *Étymologies* de Saint Isidore de Séville, Pierre Duhem a trouvé le passage suivant (traduction rectifiée par moi) :

« Le déluge est ainsi nommé parce qu'il détruit toutes choses dans un désastre causé par les eaux. Le premier déluge eut lieu sous Noé. Le Tout-Puissant, offensé par les crimes des hommes, permit aux eaux de recouvrir le cercle en détruisant tout ; il n'y eut plus de place que pour le ciel et pour la mer.

Nous en trouvons encore aujourd'hui des indices dans les pierres que nous rencontrons sur les montagnes les plus éloignées de la mer ; souvent, en effet,

elles se montrent formées de coquilles et d'huîtres ; parfois, aussi, elles ont été creusées par les eaux. » (Livre XIII, ch. xxii, Duhem, 1958).

Saint Isidore parle aussi de l'intérieur de la terre :

« Les régions inférieures : L'antre creusé sous la terre peut être considéré de neuf manières différentes ; *spelaiia* en grec, *grotte* en latin. Tous ces endroits aux exhalaisons pestilentielles sont nommés "ouvertures" que les Grecs appellent "de Charon" ou "de l'Achéron". Varron appelle aussi ouverture cet endroit et l'on dit que les ouvertures sont des lieux par où la terre souffle de l'air. L'ouverture est une brèche profonde de la terre, presque un accès. Mais en termes exacts, l'ouverture est celle de la bouche de l'homme, expression qui s'inspire des bêtes féroces dont l'avidité n'est plus à démontrer. En termes exacts, c'est comme la profondeur dont le fond est plus reculé. Mais c'est un abus de langage d'appeler profondeur ce qui est en haut ou en bas comme Virgile, *Enéide*, I, 58 : "les mers et les terres et le ciel profond". »

Barathrum désigne une profondeur incommensurable et elle est appelée Barathrum (gouffre, abîme), comme si un gouffre noir s'ouvrait des profondeurs. L'Érèbe est l'endroit le plus profond et le plus reculé. Le Styx vient de *stugeros* (horrible, pour désigner l'Hadès), c'est-à-dire de l'affliction, de ce qui rend triste ou engendre l'affliction. Le Cocyte est l'endroit des Enfers dont parle Job en ces termes. Or le nom Cocyte, d'après l'interprétation des Grecs, vient du deuil et des gémissements. Le Tartare, ou bien parce que là, tout a été troublé, vient de *tartarizein* (trembler de froid) ou bien, de manière plus juste, de *tarachên* (trouble, agitation), c'est-à-dire le fait de trembler de froid, ce qui veut dire être transi et raidi de froid, assurément parce que la lumière du soleil est insuffisante, parce que là, il n'y a jamais d'air chaud produit par la lumière du soleil, ni de souffle qui provient de ses mouvements, mais un perpétuel engourdissement car *tatarizein*, en grec, veut dire frissonner et trembler. Là, en effet (« les larmes, les grincements de dents », cf. Matthieu, 8, 12), la géhenne est un endroit rempli de flammes et de sulfures : on pense que le nom vient d'une vallée consacrée aux idoles, qui est près du mur de Jérusalem, jadis rempli de cadavres ; là, en effet, les Hébreux immolaient leurs fils aux démons et ce lieu même s'appelait géhenne. Donc le lieu du futur supplice, où les pécheurs doivent l'endurer, est désigné de la même manière. Et l'Enfer est double, fait de feu et de glace. Voilà d'où vient le mot « enfer ». De même que selon le corps, si l'on tient compte de l'ordre de son poids, les inférieurs sont tous plus lourds, de même, selon l'esprit (?), les inférieurs sont tous plus tristes ; d'où aussi l'origine du mot en grec pour désigner l'Enfer qui n'a aucune résonance douce. Et de même que le cœur vivant est au milieu, on raconte que l'Enfer est au milieu de la terre. D'où ce que nous lisons dans l'Évangile (Matthieu, 12, 10, « Au cœur de la terre »). Les philosophes disent que les Enfers sont ainsi appelés parce que là « les âmes sont transportées ».

Selon Duhem, nous apprenons de Guillaume de Conches (m. 1154) que la terre loge dans son intérieur du feu, peut-être avec un écho de Macrobe. L'histoire de la terre consiste de l'alternance des déluges et embrasements.

Dans la tradition populaire des sciences de la terre au Moyen Âge en Europe, nous rencontrons aussi les modèles d'Empédocle, de Platon et d'Aristote. Nous voyons aussi l'influence des autres philosophes (comme Héraclite) et des mythologies (comme la mythologie grecque citée par saint Isidore). La continuité de la pensée entre l'Antiquité et le Moyen Âge est bien établie. Les seules différences entre la géologie antique et la géologie du Moyen Âge est la perte des dépôts d'information — à savoir les grandes bibliothèques publiques de l'Antiquité — des sources pour le soutien de la recherche (comme celles de Museion à Alexandrie), et de la curiosité générale à cause de la ferveur religieuse (avec, en conséquence, la perte de la critique rationnelle).

Le monde musulman : un pont nouveau pour la science antique pendant le Moyen Âge :

Le commencement de l'activité de traduction des livres grecs dans le monde musulman :

- a) Pendant le huitième siècle, du Syriaque de livres grecques.
- b) Pendant le neuvième siècle, directement du Grec.

Le calife Ma'mun (814-833) a fondé, en Bagdad, une académie sous le nom de *Beyt-al Hikma* (≈ Maison de la Sagesse). Dans cette académie on a travaillé sur la révision de la géographie de Ptolémée. De ce travail, les géographes musulmans ont produit un traité de géographie et une carte mondiale, qui est désormais connue sous la désignation de la « carte de Ma'mun » suite aux recherches du Professeur Fuat Sezgin de l'Université de Johann Wolfgang Goethe à Francfort-sur-le-Main. Il a accompli la reconstruction de la carte mondiale perdue des géographes du calife Ma'mun d'après les coordonnées de Khwarizmi et Suhrah et la carte d'al-Umari. Malheureusement, le texte du traité des géographes du calife Ma'mun ne nous est pas parvenu. Par contre, nous disposons de plusieurs textes géographiques qui lui étaient en partie contemporains, en particulier ceux de l'école dite de « Balhi ». Les géographies de cette école sont plutôt des géographies humaines, mais elle contiennent beaucoup de géologie descriptive (sources, mines, minéraux, etc.). Mais dans les livres des autres nous rencontrons des renseignements géologiques aussi bien que tectoniques. De Ma'sudi (m. 956-957) par exemple nous apprenons que les tremblements de terre et les volcans sont les produits des canaux d'air, d'eaux et de feu. De ces livres on obtient l'impression d'un monde aristotélien.

Dans la fameuse encyclopédie des Frères de la Pureté et de la Sincérité (*Ihwân al-Safâ*), nous trouvons un développement cyclique de désagrégation, d'érosion, de dépôt, de soulèvement (le mécanisme n'est pas très clair) et de redésagrégation... Toute cette cyclicité, on l'attribue aux mouvements des astres, mais les tremblements de terre résultent d'explosions de vapeur dans l'intérieur de la

terre. Ces explosions peuvent casser la terre et produisent des crevasses. C'est une théorie primitive et plutôt mystique du type aristotélicien/théophrastien qui n'est guère digne des louanges qu'en fait François Ellenberger. En tout cas, elle ne contient rien d'original ! La civilisation musulmane n'a presque rien ajouté conceptuellement à l'édifice empédoclien/platonicien/aristotélicien dans les questions tectoniques. La seule interprétation originale que j'aie pu trouver dans l'enseignement musulman sur la tectonique (parce qu'il s'agit des mouvements des lignes de rivage) est le modèle de Hunain ibn Ishâq sur les mouvements de l'hydrosphère qui, à strictement parler, n'est pas du tout tectonique.

Les idées qu'on a empruntées aux écrits grecs sont presque toujours celles qui incluent des éléments de régularité et de catastrophisme. Je pense que les idées géographiques des grands géographes du monde gréco-latin autre que celles de Marinos et de Ptolémée (comme l'insularité du monde habité, la bipartition d'œcuméné le long du Taurus) avaient été transmises aux Musulmans. Peut-être cela a-t-il été une autre voie pour la transmission des idées catastrophistes/régularistes.

L'Europe pendant le Moyen Âge tardif : la géologie de Saint Albert le Grand (Albertus Magnus : 1193-1280) dans son *Liber de causis et proprietatibus elementorum et planetarum* a aussi été entièrement empruntée aux idées d'Aristote et d'Avicenne. Mais le grand penseur dominicain faisait aussi ses propres observations, dans le voisinage de Paris, sur les fossiles dans les roches.

Une idée originale (mais fausse) du Moyen Âge sur la tectonique globale concerne des déplacements indépendants des sphères de la terre et des eaux. La question qui a conduit à cette hypothèse avait été : « comment peut-on trouver l'eau plus bas que la terre ? », ce qui est impossible selon la physique d'Aristote. Dans son *Speculum quadruplex* (1244), Vincent de Beauvais (~1190-1264) supposait que la courbure de la surface des mers est différente de la courbure de la surface de la terre. Brunetto Latini (~1220 ~1294) a démontré dans son *Livres dou Tresor* (entre 1260-1267) que la surface des eaux peut atteindre différents niveaux. C'est Gilles de Rome (Egidius Romanus : ~1247-1316), dans ses deux livres, *Super secundum libro sententiarum* (= Second livre de sentences) et *Opus hexameron* qui a proposé l'idée selon laquelle la position anormale des eaux peut s'expliquer par un déplacement de la sphère des eaux, qui, selon Vincent de Beauvais, doit être indépendant de la sphère de la terre, et qui, par conséquent, doit se mouvoir indépendamment !

L'apogée de la tectonique médiévale a été le modèle de la terre et son évolution géologique par maître Jean Buridan (~1295 ~1358) qui a développé une théorie de la tectonique globale dans un esprit de géologie dynamique qui est resté sans pareil jusqu'à James Hutton dans le dernier quart du 18^e siècle. *Dans toute l'histoire des sciences de la terre pendant le Moyen Âge, et même bien après, jusqu'au 18^e siècle, nous ne voyons rien d'aussi audacieux, d'aussi brillant ni d'aussi bien fondé que la théorie du grand recteur de l'Université de Paris.*

Buridan est aussi le premier, après les Grecs, à avoir reconnu la différence fondamentale entre les montagnes et les grands plateaux continentaux. À ma connaissance, il fut aussi le premier à se rendre compte de l'érosion différentielle de différents types de roche. Après lui, il faut attendre jusqu'à Descartes pour voir une théorie de la terre entièrement nouvelle. Son disciple Albert le Saxe continua d'enseigner sa théorie.

Bien que Léonard de Vinci eût fait plusieurs observations sur la sédimentation et sur des structures géologiques comme les plis et qu'il eût formulé de fortes et brillantes critiques sur les interprétations des autres (la *Bible* incluse !), il a jamais présenté sa propre théorie complète de la tectogénèse.

Quatrième leçon : *La Renaissance : La découverte du dynamisme terrestre dans la transition du monde antique au monde moderne*

Selon Manfred Büttner de l'Université de Bochum, le protestantisme a créé une nouvelle manière de regarder les relations entre Dieu et l'homme qui changeait fondamentalement la perspective sur l'histoire de la terre. Le Catholicisme, dit-il, regarde Dieu comme le Créateur et les événements les plus importants dans l'histoire de la terre sont la création, le péché originel et l'expulsion consécutive de l'homme du Paradis. C'est pourquoi, pour les catholiques, la connaissance du théâtre de la Création, c'est-à-dire de *la géographie*, était importante. Mais pour le protestantisme, c'est la providence « le sage gouvernement de Dieu sur la création », qu'est l'aspect le plus important de Dieu. C'est pourquoi, pense Büttner, l'histoire de la terre, *la géologie*, est devenu un champ de recherche important pour les protestants. Les deux points de vue ont contribué de manière égale au développement de la tectonique pendant la Renaissance.

Au même temps Les grandes découvertes géographiques firent élargir de l'horizon de l'homme sur la terre (« Le dédoublement des produits de la création » comme Voltaire l'a dit une fois).

Pendant la Renaissance, on peut distinguer deux types de « scientifiques » de la terre :

1) Les mineurs, surtout en Europe centrale avec un intérêt pour les roches et les structures géologiques et avec une tradition romantique et religieuse. Ce groupe comprenait plutôt des observateurs de grande qualité et des connaisseurs des sciences antiques (comme Georgius Agricola).

2) Les physiographes avec un intérêt plutôt géographique et fabulistique. Les membres de ce groupe généraient des hypothèses géographiques et même géologiques. Ils lisaient plus la littérature nouvelle des voyages et des découvertes que celle de l'Antiquité (comme Gérard Mercator ou Sebastian Münster).

Les membres du premier groupe sont catastrophistes et régularistes.

Les membres du deuxième groupe sont plutôt actualistes et irrégularistes mais ces tendances ne sont pas encore très bien définies.

La vision géologique des scientifiques de la terre pendant la Renaissance était en principe biblique mais aussi aristotélicienne. Leur différence par rapport à Aristote est leur insistance sur l'observation. Dans leur respect pour les auteurs antiques, ils demeurent des savants médiévaux ; dans leur insistance sur l'observation ils sont tout à fait moderne. Ces sont des personnages typiques de transition.

La fin de la pensée géologique de l'Antiquité a été inaugurée par René du Perron Descartes (1596-1650) qui est l'un des plus importants créateurs du monde moderne et aussi de la géologie moderne. Avec Descartes nous laissons en 1644 la planète morte et rencontrons une terre vivante, dynamique. Personne n'avait jamais pensé jusqu'à Descartes, avec la seule et remarquable exception de Jean Buridan, que la terre peut avoir une dynamique résultant des propriétés de sa propre structure rocheuse.

Descartes a introduit ses idées sur l'évolution tectonique du globe dans les *Principes de la Philosophie* (1644). Sa théorie est tirée de ses considérations sur la géométrie de la théorie héliogénique de Copernic et de la physique d'Aristote.

Utilisant les nouvelles théories héliocentriques, Descartes considérait que tous les grands objets dans l'espace étaient nés (à cause des tourbillons) comme étoiles et se refroidissaient ultérieurement en forme de couches successives. Donc, avec Descartes, nous avons, pour la première fois dans la géologie, une terre « en oignon » avec plusieurs couches concentriques de natures différentes, c'est-à-dire, les éléments d'une architecture de la terre, qui sont inclus dans le concept d'une *couche*. *La couche nous a donné un fil conducteur dans le chaos des structures géologiques*. Le concept de Descartes est entièrement hypothétique. Le grand génie danois, Niels Stensen, a donné au concept de Descartes un fondement basé sur l'observation. C'est pourquoi on peut dire que la géologie moderne a commencé avec Descartes en 1644.

Cinquième leçon : La tectonique à l'ère de la révolution scientifique et des Lumières

Jusqu'ici tout le développement dans l'histoire de la tectonique s'était fait à travers des observations de la configuration de la surface de la terre et des hypothèses plus ou moins hardies pour l'expliquer. Dans cet esprit il n'y a pas une *conception d'architecture interne* établie par une étude des éléments d'une telle architecture.

Aucune des représentations des paysages avant le 17^e siècle ne nous montre une compréhension de la structure interne, c'est-à-dire, de l'architecture des paysages qui sont dépeints. Aucune des peintures précédentes ne montre la moindre trace de l'architecture ou, pour mieux dire, de l'anatomie des paysages

dépeints. Il est clair que pour pouvoir représenter le paysage, il faut comprendre sa structure interne, son architecture, son anatomie. Pour les comprendre il est nécessaire de savoir quels sont les éléments de cette structure, de cette architecture, de cette anatomie. Pendant la Renaissance, on avait déjà compris l'architecture de certains éléments structuraux, surtout ceux des roches intrusives (comme les filons ou de petits massifs intrusifs), parce qu'on les avait étudiés dans les mines beaucoup plus intensivement que les autres roches. Pour la première fois avec Descartes, nous avons un moyen pour établir un fil d'Ariane afin de suivre la structure dans la montagne entière, même dans un pays ou dans un continent entier. Mais c'est seulement une hypothèse.

C'est Niels Stensen (Nicolaus Stenonius 1638-1686), le fondateur de la *stratigraphie*, qui l'a concrétisée.

Qu'est ce que la stratigraphie ? La stratigraphie est la branche de la géologie qui nous permet de déduire les relations temporelles des relations spatiales. Mais pour l'accomplir, il faut comprendre les phénomènes géologiques. Sténon nous a donné la possibilité d'établir des chronologies géologiques. Donc, avec Sténon, les géologues du 17^e siècle ont obtenu :

- 1) une justification observationnelle et théorique sur la base des phénomènes aujourd'hui visibles sur la surface de la planète pour le concept de *couche* implicite dans le schéma de Descartes ;
- 2) une méthodologie pour trouver un fil conducteur pour établir l'architecture des terrains ;
- 3) une méthodologie pour deviner une chronologie de l'architecture établie ;
- 4) une manière de penser qui est à la fois actualiste (pour les petits événements) et catastrophiste (pour l'histoire générale de la terre), mais en tout cas régulariste à un degré extrême.

Dès que le concept de couche a été introduit, on a commencé à voir l'intérieur des montagnes (au moins près de la surface de la terre) ! L'un des premiers à nous avoir donné une image de l'architecture interne d'une montagne fut le comte Luigi Ferdinando Marsili (1658-1730). La question la plus importante est donc devenue « comment expliquer ces énormes déformations qu'on apprenait soudain à voir dans la structure des montagnes ? » On a d'abord essayé d'utiliser, comme d'habitude, une explication pour ainsi dire « prêt-à-porter » tirée de la *Bible*, à savoir le *Déluge*.

À l'époque de Buffon on a commencé à décrire des successions de couches, appelées « tableaux », dans différents endroits. Dans les Montagnes de Harz, en Allemagne, par exemple, Johann Gottlob Lehmann (1719-1767) a distingué deux types de successions, à savoir les « Ganggebürge » (= Montagnes à filons) et les « Flötzgebüre » (= Montagnes à couches [horizontales]). Il considérait que les *Ganggebürge* avaient été formées pendant la création du monde et redressées pendant le déluge. Les *Flötzgebürge* consistaient en couches à charbon et, au-

dessus, en les *Kupferschiefer* (= les schistes à cuivre) (aujourd'hui le Carbonifère supérieur et le Permien). Son travail a été poursuivi vers le haut de la séquence (c'est-à-dire, dans la Trias) par G. C. Füchsel (1722-1773) qui a introduit les termes de *strato* (couches), *situs* (= membre) et *series montana* (= formation) afin d'obtenir une terminologie des unités *lithostratigraphiques* pour subdiviser les séquences établies.

L'appréciation de l'importance des discordances comme indication d'une interruption dans le flux des événements géologiques, comme changement du régime régnant, est très rapidement devenue à la mode.

Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794) a été le premier à voir qu'une interprétation juste des *structures internes* des roches pourrait être possible seulement si l'on considérait les conditions de formation et les structures actuelles des successions de roches. Il a développé grâce à elles une théorie remarquable, et encore, juste pour interpréter les changements dans le niveau de la mer par le passé.

Après Lavoisier, on peut apercevoir deux directions principales dans l'interprétation du passé de notre planète.

Une direction : très régulariste, catastrophiste, encore inspirée par la Bible (même indirectement). Cette direction s'est d'abord développée en Suède parmi des étudiants de von Linné (Linnaeus) comme Torbern Bergman et Wallerius, et peu après en Allemagne parmi les mineurs de Freiberg sous la direction d'Abraham Gottlob Werner (1749-1817) qui avait été influencé par les savants suédois et par les traditions minières de ce pays.

Une autre direction : Irrégulariste, uniformiste, entièrement indépendante de toute mythologie, développée principalement par le lettré privé James Hutton (1726-1797) d'Edinburgh, médecin de formation et fermier par vocation (il s'agit de l'école dite des « plutonistes »). Hutton ne voyait pas d'événements soudains dans l'histoire de la terre, mais des processus doux, banaux, sans différence avec ceux d'aujourd'hui. Sa philosophie de la science venait de la prise de conscience de la part de David Hume du fait qu'« il ne peut y avoir d'argument capable de démontrer que ces instances dont nous n'avons pas eu l'expérience ressemblent à celles dont nous avons eu l'expérience », en d'autres termes « un "devrait" ne peut être déduit d'un "est" ». Il semble avoir senti que la seule possibilité qui lui restait était d'interpréter le peu de données dont il dispose en termes de modèles qu'il pouvait construire. Mais comment construire des modèles d'une chose dont rien n'était connu ? Il décide de le faire par analogie et, pour commencer, de prendre le seul analogue qu'il connut : la Terre telle qu'elle était, telle qu'il en avait l'expérience. Cette supposition (et j'insiste : c'était seulement une supposition, une hypothèse) fut très éclairante, et soudain l'histoire de la terre est devenue non seulement intelligible *mais testable*. Hutton savait bien l'importance de la possibilité de tester ses idées. D'ailleurs, il a publié un ouvrage en

trois gros volumes sur l'épistémologie en 1794 pour montrer l'importance de la testabilité des idées en science.

Comme fermier, Hutton avait vu que la terre était érodée et transportée sans cesse par les eaux. Si l'érosion et le transport avaient continué en l'absence d'un agent constructif, ils auraient pu détruire la terre en un temps très court. Donc il a fait le raisonnement qu'un agent était nécessaire pour soulever la terre continuellement afin d'agir contre les effets de l'érosion. Il a pensé que c'était la chaleur intérieure de la terre qui pourrait être capable de faire cela. C'est une théorie entièrement Théophrastienne mais conçue dans le cadre des connaissances recueillies depuis le temps d'Agricola.

À cause de la grande catastrophe de la Révolution française, l'école française de la science qui avait été très avancée a été décimée (Bailly, Bochart de Saron, Dietrich, Lavoisier, La Rochefoucauld, Condorcet... et beaucoup d'autres)! Malgré cela, le premier développement après Hutton et Werner est issu de la France du côté de l'anatomie comparée.

Sixième leçon : *La tectonique au dix-neuvième siècle : Les legs de Cuvier et Lamarck*

Le Baron Georges Cuvier (1769-1832) a inventé la *biostratigraphie*, la branche de la stratigraphie qui nous permet de déduire les relations temporelles à partir des relations spatiales des fossiles, à la fin du dix-huitième siècle.

Le plus grand avantage de la biostratigraphie est ce que la succession des fossiles dans le temps géologique est unique, sans aucune répétition dans le monde entier. On peut donc identifier *l'ordre d'accumulation des roches sédimentaires* même si leur ordre s'est brouillé ultérieurement. On peut ainsi étudier les régions déformées où la succession originale des roches a été bouleversée.

Le premier à avoir utilisé la puissance de la biostratigraphie pour la tectonique a été le grand géologue allemand Léopold von Buch, Baron de Gelmersdorf (1774-1853). Hutton avait déjà prétendu que les intrusions individuelles avaient pu soulever les montagnes isolées, comme indiqué par son interprétation de la géologie d'Arran. Après ses études dans la vallée du Fassa en Tyrol, Léopold von Buch crut qu'il avait établi la même chose pour un système entier de montagnes, à savoir les Alpes. Léopold von Buch a suivi Hutton dans l'idée que la puissance magmatique peut soulever les roches autour d'une intrusion. En effet, il avait développé, dans le Massif central, l'hypothèse des cratères d'élévation. Dans sa considération de la distribution des volcans dans le monde, Léopold von Buch a également trouvé que les volcans en Asie étaient groupés le long de lignes parallèles aux chaînes de montagnes ou parallèles aux lignes des îles. *Il a développé l'hypothèse selon laquelle une grande ligne d'intrusion doit se trouver le long des axes de toutes les grandes chaînes des montagnes du monde.*

Léopold von Buch croyait donc que les montagnes étaient formées par une poussée verticale rapide de magma de porphyre à augite le long de fissures parallèles à la direction des chaînes de montagnes. Von Buch pensait que cette poussée ainsi que le soulèvement de montagne qui lui était associé étaient si rapides que, dans le cas des Alpes, les eaux marines qui les recouvraient originellement avaient été poussées vers le nord en cascades géantes et avaient projeté les blocs erratiques sur les crêtes des montagnes du Jura ! Grâce à la biostratigraphie, Léopold von Buch a pu établir le temps de soulèvement des chaînes de montagnes en utilisant les séries de sédiment redressées et les séries qui les couvrent avec discordance. Il a aussi indiqué que l'on pouvait utiliser les relations d'entrecroisement des chaînes afin de trouver des séquences de formation des montagnes.

Le grand tectonicien français Léonce Élie de Beaumont (1798-1874) a été l'une des figures les plus importantes, et les plus négligées, de la tectonique du dix-neuvième siècle. *Les traits principaux de l'œuvre d'Élie de Beaumont sont :*

1. le refroidissement de la terre comme cause générale des mouvements de la croûte terrestre ;
2. la formation des montagnes par écrasement latéral ;
3. l'origine des montagnes dans les grands bassins sédimentaires ;
4. la formation des montagnes le long des éléments linéaires d'un réseau pentagonal généré par plusieurs épisodes de contraction ;
5. l'idée du synchronisme des montagnes qui se trouvent le long de grands cercles passant par le même pôle ;
6. la validité générale de l'hypothèse des cratères d'élévation de Léopold von Buch.

Septième leçon : « *La réaction au vingtième siècle : le retour à Descartes* »

Rappelons que les chaînes de montagnes selon Élie de Beaumont sont :

- a) linéaires ;
- b) symétriques ;
- c) produites par écrasement latéral et par soulèvement ;
- d) toujours sorties de grands bassins sédimentaires ;
- e) le résultat de la contraction.

L'asymétrie fondamentale dans la structure des chaînes de montagnes avait été établi depuis les années quarante jusqu'aux années soixante-dix du dix-neuvième siècle par les études géologiques des Américains dans les montagnes des Appalaches.

Selon Constant Prévost (1787-1856), le grand géologue français et l'un des fondateurs de la Société Géologique de France, toute l'histoire de la terre se caractérise par une baisse continue du niveau de la mer. Donc il pensait qu'il n'était pas possible qu'il y eût des soulèvements, parce que chaque soulèvement

sous-marin devait diminuer le volume des bassins océaniques, causant une hausse du niveau de la mer. Prévost interprétait toute la tectonique comme une conséquence de la subsidence. Tout « soulèvement » était pour lui relatif par rapport à des régions avoisinantes qui s'affaissaient. Il attribuait les chaînes de montagnes à des « contre-coups » de la subsidence. Cette interprétation a influencé énormément Édouard Suess (1831-1914), peut-être le plus grand géologue qui ait jamais vécu.

Déjà comme paléontologue, Suess a fait beaucoup de travaux de terrain, pendant lesquels il a observé des structures géologiques compliquées dans les Alpes et dans les Carpathes. Il en a tiré des conséquences tectoniques, qui lui ont montré la fausseté des idées dominantes de son temps sur la nature de l'orogénèse, c'est-à-dire la formation des montagnes. Suess avait déjà conclu que la position de Néogène d'Engenbourg avait été contrôlée par des changements du niveau de la mer et non par les oscillations des continents. Suess interprétait déjà en 1867 les Klippes comme des résultats du plissement à cause duquel les couches résistantes de calcaire avaient été cassées et fragmentées. *Il a donc nié toutes les idées verticalistes*. Vers la fin des années dix-huit-cent-soixante, Suess est parvenu à rejeter l'idée de soulèvements de la croûte en se fondant sur ses propres observations et déductions. Pendant son voyage en Italie méridionale il a vu que la région de Basilicata présentait une structure géologique asymétrique avec un déversement général vers le nord-est. À ce moment-là il a su que les Alpes et les Carpathes avaient aussi eu des structures asymétriques avec un seul sens de déversement. Donc il a généralisé : toutes les grandes chaînes de montagnes de notre planète ont des structures asymétriques.

Il a contrôlé sa généralisation en utilisant la littérature mondiale de la géologie. Le premier fruit de ses travaux a été son magistral petit livre « Die Entstehung der Alpen » (= L'Origine des Alpes), dans lequel il a traité de presque toutes les grandes chaînes de montagnes alors bien connues. La première publication de Suess (1880) a porté sur l'impossibilité des oscillations du sol. Le *magnum opus* de Suess, un chef-d'œuvre de la géologie, a été *Das Antlitz der Erde* (= *La Face de la Terre*). Le fil conducteur de l'œuvre de Suess est meilleur exprimé par sa phrase « C'est à l'écroulement du globe terrestre que nous assistons » (*La Face de la Terre*, trad. française, t. 1, p. 823). « Les bassins maritimes résultent de la conjonction d'affaissements multiples, comme le montre l'histoire de la Méditerranée. » (FT, t. 4, p. 1618).

Nous savons que Suess a entièrement rejeté le concept du géosynclinal dans le dernier volume de la *Face de la Terre*. Selon Suess, la Téthys avait été un océan avec une structure semblable à tous les autres océans actuels. Sa destruction avait été une conséquence du raccourcissement résultant de la contraction.

Clarence Edward Dutton (1841-1912) a introduit en 1892 le terme d'isostasie (en 1892 il l'avait introduit déjà sous la forme d'isostacy, qui n'a pas été jugée acceptable du point de vue de la translittération du Grec !)

L'isostasie n'est autre qu'une application du principe d'Archimède aux continents. Dans cette optique on voit les continents comme flottants dans un substratum plus lourd. Quand un continent est chargé par une montagne ou par le remplissage d'un bassin sédimentaire il descend dans son substratum. Quand la charge est éloignée il monte.

Dutton a développé ses idées sur celles semblables d'Élie de Beaumont et de Sir John Herschel. La combinaison de l'idée de l'isostasie avec les interprétations de Suess va donner naissance aux idées de Wegener au vingtième siècle.

Huitième leçon : « *La réaction au vingtième siècle* » (suite) et « *La tectonique des plaques : la renaissance des legs de Cuvier et de Lamarck* »

Une caractéristique importante du vingtième siècle est l'achèvement des découvertes géographiques, parce que : « Ennemie implacable de tous les rêves géologiques, la géographie est à la géologie ce que l'histoire est à la fable. » (Conrad Malte Brun)

Dans l'histoire de la tectonique du vingtième siècle, après la mort du grand géologue autrichien Edouard Suess le 26 avril 1914, on observe une curieuse évolution. Les idées de Suess, telles qu'elles sont exprimées principalement dans ses deux livres *Die Entstehung der Alpen* (« L'Origine des Alpes » 1875) et *Das Antlitz der Erde* (« La Face de la Terre » 1883-1909), avaient largement dominé, sinon entièrement dirigé, le monde de la tectonique dans le dernier quart du dix-neuvième siècle et pendant la première décennie du vingtième. La curieuse évolution à laquelle je viens de faire allusion avait en fait commencé durant la première décennie du vingtième siècle, avant la mort de Suess. Les vingt premières années du vingtième siècle ont vu la publication de la plupart des écrits qui ont donné son orientation à la tectonique jusqu'à l'apparition de la tectonique des plaques dans les années soixante. Les manuels fondés sur cette orientation ont commencé à apparaître après 1920, avec deux importantes exceptions : le grand et très influent *Traité de géologie* en quatre volumes d'Émile Haug (1907-1911) et le petit *Géologie* de Ferdinand Löwl d'Autriche (1906).

Donc, quand Haug commençait à écrire son *Traité*, on avait déjà appris que les grandes chaînes de montagnes sont les résultats de grands raccourcissements latéraux. En conséquence, il était devenu impossible de faire de la paléogéographie sans tenir compte des considérables mouvements horizontaux. Malgré cela, Haug a dessiné ses géosynclinaux avec les mêmes largeurs que leurs produits, c'est-à-dire les montagnes. Ce n'était pas seulement un esprit « fixiste » mais une négligence totale des résultats d'une branche de la géologie, à savoir de la géologie structurale, parce que, *avec le vingtième siècle, nous sommes entrés dans une ère de la spécialisation en géologie qui a eu des effets désastreux.*

La séparation des événements *orogéniques* des événements *épirogéniques* était le fil conducteur de la pensée tectonique de Hans Stille. Les différences entre

les deux types des phénomènes avaient été tabulées comme suit par Stille (1924 et *seq.*) :

- 1) L'orogénèse a une petite longueur d'ondes mais une large amplitude.
- 2) L'orogénèse change la texture des roches.
- 3) L'orogénèse est épisodique.

Par contre :

- 1) L'épirogenèse a une grande longueur d'ondes mais une petite amplitude.
- 2) L'épirogenèse ne change pas la texture des roches.
- 3) L'épirogenèse est continue.

C'était un retour complet à la distinction entre les « ridements » et les « bossèlements » d'Élie de Beaumont via le géologue américain Grove Karl Gilbert (1843-1918).

Stille a proposé aussi une loi du synchronisme des événements orogéniques (1918, 1924) : « Toute orogénèse, inclusive de la formation des montagnes aux blocs et failles verticales, est bornée aux intervalles courts, bien définis et globaux. » *C'est aussi un retour complet aux révolutions d'Élie de Beaumont.*

La régularité des événements tectoniques est exprimée, selon Stille, dans les cycles géotectonique et magmatotectonique, auxquelles il donna leurs formes définitives en 1940 :

Le cycle géotectonique

- 1) La subsidence géosynclinale (phase préparatoire).
- 2) Orogenèse de type alpin.
- 3) Orogenèse de type germanique (stade du quasi-craton).
- 4) Consolidation totale (stade du craton complet).

Le cycle magmatotectonique

- 1) Le magmatisme initial (basique et ultrabasique).
- 2) Le plutonisme synorogénique (granitique).
- 3) Le volcanisme subséquent (andésitique).
- 4) Le volcanisme final (basique).

À mon avis, Émile Argand (1879-1940) fut le plus grand tectonicien du vingtième siècle (qui pouvait parler dix-sept langues). Déjà au cours de son analyse de l'évolution tectonique des Alpes occidentales, Argand avait vu que de grands déplacements des radeaux continentaux étaient nécessaires pour pouvoir expliquer la genèse des grandes nappes de charriage et des plis couchés qui forment les Alpes. L'Asie lui a montré que sans d'immenses déplacements des continents, il n'aurait pas été possible d'expliquer l'évolution structurale des continents en général. Donc il a adapté et développé la théorie de Wegener dès 1916.

La Tectonique de l'Asie, l'un des plus grands livres en géologie, présenté au 13^e congrès géologique international à Bruxelles en 1922 fut le grand classique d'Argand, accompagné par la Carte tectonique de l'Eurasie présentée par lui au 13^e congrès géologique international à Bruxelles. Cette carte est la première carte tectonique d'un continent jamais faite.

Dans l'esprit d'Argand, ses « plis de fond » représentent le plissement et/ou le chevauchement de l'entière croûte continentale. Les virgations, formées par des groupements de plis et introduites par Suess, montrent la direction du flux des matériaux de la croûte pendant la déformation en volume (d'après Argand, 1924), d'où Argand déduisit la formation des structures asiatiques comme résultat de l'écoulement de la croûte terrestre.

Malgré les innovations qu'il a introduites à la richesse conceptuelle de la tectonique, dans beaucoup de ses interprétations Argand resta sous l'influence de l'école Kober-Stille dans toute sa vie. Par exemple, dans sa reconstruction du Gondwana-Land il a introduit un appendice énorme de l'Inde seulement pour maintenir l'aspect géosynclinal de la Téthys ! Il regardait la chaîne alpo-himalayenne comme résultat de la clôture de la Téthys. Mais, les détails de cette clôture étaient, selon lui, extrêmement compliqués, en particulier autour de la Méditerranée !

Neuvième leçon : « *Les précurseurs de la tectonique des plaques, la renaissance des legs de Cuvier et Lamarck et conclusions : la morale de cette histoire* »

La crise de la tectonique avant la tectonique des plaques

La tectonique fixiste classique a échoué à répondre aux nouvelles observations et aux déductions théoriques de la géophysique faites entre 1900 et 1915, à savoir :

Observations adverses

1. L'immense raccourcissement dans les chaînes de montagnes (plus de 100 km rien que dans les Alpes : Bertrand, Termier, Suess, Heim, Argand).
2. L'existence d'extensions significatives dans la lithosphère à plusieurs endroits larges (par exemple, dans le Fossé Rhénan, l'Afrique orientale, l'Asie centrale, l'Amérique du Nord occidentale, soulignées par Suess, Erich Krenkel et d'autres géologues).
3. La nature différente des fonds océaniques et des continents du point de vue des types de roches dominantes (Suess) en dépit du fait que dans le passé géologique au moins un océan (la Téthys) avait disparu.

Déductions adverses

1. L'isostasie ne permettait pas l'effondrement des continents pour créer des océans.

2. La découverte de la radioactivité par Henri Becquerel a mis en doute la réalité d'un refroidissement global significatif pendant le passé géologique.

Les cinq points donnés ci-dessus montrent conclusivement qu'une tectonique contractionniste et fixiste est impossible à soutenir. La réponse de Wegener, d'Argand et de quelques autres à cette situation était de développer une tectonique mobiliste, ou, comme le disait Argand, une « tectonique en mouvement ». Mais cette tectonique mobiliste inventée par Wegener avait un défaut fatal : les fonds océaniques ne sont pas moins résistants aux déformations que les continents, comme cela a été montré par Sir Harold Jeffreys (déjà dans la première édition de son fameux manuel *The Earth* en 1924). Donc la dérive imaginée à la manière des mobilistes était impossible.

La crise de la tectonique dans des années trente

Une tectonique fixiste, surtout contractionniste, apparaissait impossible. Mais la seule théorie mobiliste alors existante, celle de Wegener et d'Argand et de leurs disciples, était également impossible. La question était donc : que faire ?

Comme disait Daly en 1914, il y avait déjà une foule d'observations auxquelles cependant il manquait la précision nécessaire. Il y avait aussi une pénurie d'idées nouvelles. Cette déplorable pénurie résultait de la philosophie positiviste stérile de la plupart des géologues et des géophysiciens d'un intervalle allant des années trente à l'invention de la tectonique des plaques par J. Tuzo Wilson en 1965, que j'appelle d'ailleurs « l'intermezzo ténébreux » dans l'histoire de la tectonique.

Les ténèbres de l'intermezzo concernaient la pauvreté des idées, mais pendant le même intervalle, on a recueilli une foule de nouvelles données critiques.

1. D'abord on a montré l'existence d'une ceinture de grandes anomalies négatives de pesanteur le long des arcs insulaires du Sud-Est asiatique et des Caraïbes. Cette observation indiquait une insuffisance de masse de la croûte terrestre à cet endroit et elle était interprétée en termes de modèle de pli crustal symétrique appelé *tectogène* par le géophysicien hollandais Félix Andries Vening Meinesz (1887-1966).

2. Cependant, immédiatement après, les sismologues hollandais ont démontré l'existence des zones sismiques asymétriques sous les arcs insulaires de l'Asie du Sud-Est jusqu'à une profondeur de 600 km. Ils les ont interprétées comme les effets d'énormes chevauchements.

De plus, dans les années cinquante, les géologues ont démontré l'existence des mouvements horizontaux sur des centaines de kilomètres le long des failles

géantes (les décrochements). Toutes ces observations étaient incompatibles avec une interprétation fixiste de la tectonique globale.

Pendant les années cinquante, Lord Blackett et ses étudiants ont démontré que l'aimantation magnétique permanente des roches volcaniques de différents âges était incompatible avec leurs positions géographiques actuelles. Leurs observations sur les inclinaisons montraient des déplacements de milliers de kilomètres et celles sur les déclinaisons montraient des rotations de centaines de degrés. On a vu très vite qu'une interprétation raisonnable qui n'évoquait pas la dérive des continents était devenue impossible. Mais comment éliminer l'obstacle érigé devant cette interprétation par Sir Harold Jeffreys ? C'était le travail d'un géologue américain, Harry Hammond Hess.

Déjà en 1954 Wilson réfléchissait sur les mouvements des blocs indépendants à la surface de la terre. Lynn Sykes (1967) fut le premier test rigoureux des idées de Wilson. Les autres articles fondateurs de la tectonique des plaques n'ont été que des autres tests rigoureux des idées de Wilson rendus possibles grâce à la nouvelle technologie.

Wilson a vu la clôture et la réouverture des océans le long des Appalaches et des Calédonides comme une des conséquences pour la géologie historique de la tectonique des plaques. Le Cycle de Wilson (1968) d'ouverture et de clôture des océans, nommé par John Dewey et Kevin Burke en 1975, et la mobilité tridimensionnelle dans l'histoire des chaînes de montagnes, démontré par Wilson en 1968 sur l'exemple des Cordillères canadiennes, sont les conséquences générales des tectoniques des plaques de Wilson.

Conclusions générales de ce cours. L'évolution postérieure à Suess (en partie contemporaine des dernières années de sa vie) de la tectonique a été caractérisée par ce qui semblait être à l'époque l'émergence de deux écoles de pensée distinctes. Une école, que j'ai appelée ailleurs l'école *Kober-Stille* et qui représente la continuation directe de la pensée de Haug, prend en fait racine dans les enseignements d'Élie de Beaumont en passant par des géologues de la côte Est des États-Unis (tels que James Dwight Dana) et est caractérisée par une croyance dans le *caractère ordonné de la nature* (et dans sa nature déterministe) et par la croyance en son *comportement catastrophique*. Philosophiquement, les membres de l'école Kober-Stille étaient exclusivement des *positivistes*, tout à fait comme Élie de Beaumont lui-même. À travers Élie de Beaumont, leur enseignement était connecté à ceux de Léopold von Buch, Georges Cuvier et Abraham Gottlob Werner. Par contraste, ce que j'ai appelé l'école *Wegener-Argand* représentait la continuation directe de la conception que Suess avait de la tectonique : une Nature largement *désordonnée* (c'est-à-dire indéterministe) avec un *comportement uniforme*. Les Wegeneriens-Argandiens étaient des *rationalistes critiques* dans leur approche de la science (pour utiliser un *terme* anachronique) et en tant que tels étaient les héritiers intellectuels de James Hutton, Charles Lyell et Constant Prévost. Ainsi, ces deux écoles du vingtième siècle (voir le tableau)

TABLEAU

| <i>École Kober-Stille</i> | <i>École Wegener-Argand</i> |
|---------------------------|-----------------------------|
| Catastrophisme | Uniformitarisme |
| Ordre | Désordre |
| Déterminisme | Indéterminisme |
| Positivisme | Rationalisme critique |

n'étaient véritablement rien d'autre que la réapparition d'une scission qui avait déjà existé en tectonique. La tectonique des plaques représente une continuation de la pensée des Wegener-Argandiens non parce qu'elle est mobiliste, mais parce qu'elle est non régulariste et actualiste. Wilson, lui, d'abord fixiste et contractionniste, était néanmoins un Wegener-Argandien à cause de sa philosophie non régulariste et actualiste. Il était aussi un rationaliste critique au sens de Popper, parce qu'il était toujours prêt à abandonner ses théories face aux observations adverses et à en développer de nouvelles à leur place.

Pendant ces neuf leçons nous avons vu que chaque développement en tectonique a commencé avec la critique d'une hypothèse. On ne commence *jamais* par des observations dans un vide théorique comme y insistent les philosophes positivistes depuis Aristote et surtout Sir Francis Bacon. Malheureusement tout enseignement en géologie, même aujourd'hui, apprend, à tort, que la recherche géologique doit commencer par des observations. Mais nous avons vu que la géologie avait commencé avec des idées mythologiques, avec des rêves. Ceux-ci sont devenus science quand on a commencé à les tester en utilisant des comptes rendus d'observation. En Ionie nous avons appris que l'on avait abandonné la mythologie parce qu'elle était en contradiction avec les observations. Toute théorie est abandonnée de la même manière.

Nous avons vu qu'il y a quatre grandes périodes dans l'histoire de la tectonique :

1. Période mythologique (jusqu'au 6^e siècle av. J.-C.) ;
2. Période de la terre spongieuse (6^e s. av. J.-C.-17^e s. AD) ;
3. Période de la terre des mouvements dominants radiaux (17^e s.-20^e s. AD) ;
4. Période de la terre des mouvements irréguliers (20^e s. AD-jusqu'à nos jours).

À travers ces quatre périodes, on constate une augmentation de l'irrégularité dans le comportement de la terre admis par les différentes théories de quelque type que ce soit. Le comportement de la terre est aussi admis comme étant plus en plus actualiste.

Lorsqu'un scientifique rédige une histoire de sa discipline, ou des sciences en général, il cherche à faire appréhender le *progrès* dans les sciences, la façon dont notre savoir *et* notre compréhension se sont accrus, ainsi que son propre rôle *et/ou* le rôle de son domaine particulier dans ce progrès. Les scientifiques s'intéressent au processus rationnel par lequel le progrès est réalisé. Les historiens, généralement, s'intéressent à la science en tant que phénomène social, en

tant que produit de l'interaction humaine, qui peut être (et est le plus souvent) extrêmement diverse, dépendant de la fantaisie subjective des individus.

En revanche, le processus logique selon lequel la science progresse a des règles qui ne peuvent être changées par fantaisie. *Ce qui est important est que nous pensions que notre compréhension actuelle de la Nature est meilleure que les précédentes et que cela peut être démontré.* D'où peut on dire que « l'histoire d'une science est la science elle-même » qui est en fait une citation de Goethe.

Le séminaire associé au cours :

1. « Du mythe à la pensée positive » par le Professeur Jean-Pierre Vernant du Collège de France.

2. « Cartographie dans l'Antiquité : comment représenter le monde habité sur une carte ? » par le Dr. Florian Mittenhuber de l'Université de Berne.

3. « La Géographie physique chez les Musulmans : L'origine arabe des cartes européennes » par le Professeur Fuat Sezgin de l'Université de Johann Wolfgang Goethe à Francfort-sur-le-Main (lu par Şengör).

4. « La Protogée de Leibniz et le Telliamed de Benoît de Maillet : deux théories de la formation de la terre parentes ou contradictoires ? » par le Dr. Claudine Cohen de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales.

5. « La tectonique par affrondement de Descartes à Dolomieu » par le Dr. Gabriel Gohau.

6. « L'apport de Cuvier à la stratigraphie » par le Professeur Philippe Taquet, Muséum National d'Histoire Naturelle.

7. « History of tectonics in Russia : a little-known source of much influence » par le Professeur Boris A. Natal'in de l'Université Technique d'Istanbul.

8. Naissance de la tectonique de plaques : un point de vue personnel » par le Professeur Xavier Le Pichon du Collège de France.

9. Tectonique à Neuchâtel : deux siècles de tradition ; des déformations de la couverture à celles des zones profondes ; des déplacements verticaux et tangentiels » par le Professeur Jean-Paul Schaer de l'Université de Neuchâtel.

Publications du titulaire parues pendant l'année académique 2004-2005

Livres :

1. 2004 : *Yaşamın Evrimi Fikrinin Darwin Dönemi Sonuna Kadarki Tarihi* [L'Histoire de l'Idée de l'Évolution jusqu'à la fin de l'Ère de Darwin] : İTÜ Yayınları, İstanbul, 187 pp.

2. 2005 : *Une Autre Histoire de la Tectonique* : Leçon Inaugurale du Collège de France, Fayard, Paris, 79 pp.

Autres activités de la Chaire internationale pendant l'année académique 2004-2005

Traduction et publication de la seule Biographie détaillée d'Édouard Suess par A. V. Obrutchev et M. Zotina qu'a été originalement publiée à Moscou en 1937 (traduction encore en cours).

Pendant son séjour à Paris le titulaire a donné deux conférences à Orléans et deux autres à Tübingen sur la géologie de l'Asie centrale et sur le décrochement nord-anatolien.