

CE QU'IL FAUT LIRE POUR DECOUVRIR COMPRENDRE

ANNEXE : HISTOIRE DES MODELES DE STRUCTURES DE LA TERRE.

HISTOIRE DES SCIENCES GEOLOGIQUES

PREAMBULE

L'intitulé de ce cours est officiellement histoire des sciences, mais en accord avec mes collègues du département des mines et de la géologie, nous avons rajouté « géologiques »

Pourquoi ?

Parce que la géologie, ou littéralement science de la terre, située au carrefour de toutes les autres sciences et techniques a évolué en parfaite synchronie avec ces disciplines scientifiques.

L'évolution des idées, des découvertes et des modèles géologique ont toujours bénéficié des découvertes scientifiques et techniques de leur temps.

Dès le départ, les premiers humains ont distingué les roches dures et les roches tendres, quelque fois les roches belles et les moins belles. Les paramètres physiques et esthétiques ont très tôt questionner l'intelligence, c'est-à-dire la faculté de discerner (connaître), et de reconnaître (apprendre et retenir). L'observation, le tri, et l'emploi des roches, sans tentatives d'explication, furent les premières formes de connaissance et de méthodologies rationnelles C'est la préhistoire géologique, pragmatique, avec ses premières techniques et outils. (premiers croquis cartographiques géologiques ?)

Avec l'ère des civilisations, celle de la pierre de construction puis des premiers métaux. Prospection, sélection des matériaux de construction et des métaux pour les ustensiles, outils et armes, avec comme seules méthodes et techniques, celles de l'observation, la collecte et la localisation des roches utiles. C'est l'époque de la **géologie pragmatique**. C'est en même temps, l'époque des premiers modèles spéculatifs qui essaient d'expliquer la nature et l'origine de la matière et de la Terre. Ce sont les Grecs qui s'y intéresseront le plus.

La démarche de pensée rationnelle d'Aristote, basée sur l'expérience, empirique et déductive, coexiste avec celle de démarche de pensée plus ambitieuse et plus vaine pour l'époque, celle de pensée toujours rationnelle mais totalement abstraite, (Platon). Aristote traite des objets et modèles, connaissables et réels pour comprendre et expliquer, et Platon traite des objets et modèles au moyen de formes géométriques, des objets abstraits. La pensée oscille entre le magique et le rationnel. **C'est l'ère de la géologie totalement spéculative** qui va expliquer le monde jusqu'au 17^{ème} siècle. Les héritiers d'Aristote ont cependant déjà commencé à trier, à classer les objets géologiques

Plus tard, avec Galilée et la rupture formalisée entre la pensée magique et la pensée scientifique, les tentatives d'explication des roches et de la Terre se multiplient. Il en est de même pour les courants de pensée, les « écoles », et les controverses.

Neptunisme-Plutonisme, catastrophisme-« actualisme », temps longs-temps courts, fixisme-mobilisme, sont au cœur de ces controverses. La géologie démultiplie ses disciplines qui deviennent affaire de spécialistes : pétrologie, paléontologie, sédimentologie, minéralogie, géochronologie. Du 18^{ème} au 19^{ème}, **ère de gloire de la géologie**.

Les propriétés mécano physiques de minéraux et les propriétés optiques des cristaux et de leurs réseaux, convertissent une première fois nombre de géologues en chimistes

Avec le développement des techniques et des outils de mesures de plus en plus performants, la géologie démultiplie ses disciplines qui passent insensiblement de sciences naturelles, empiriques et descriptives, à celle de sciences empirico-formelles.

Mais les faits sont têtus et la contingence des phénomènes géologiques empêchera le réductionnisme théorique dès lors qu'il n'intégrera pas la complexité et l'abondance des facteurs mis en jeu dans ces phénomènes

Au niveau des outils, le microscope est d'abord l'outil des naturalistes généralistes avant d'être essentiellement géologique puis d'être partagé avec la biologie.

Avec des roches et minéraux de synthèse, des reconstitutions 2D puis 3D, de plus en plus « réalistes », c'est la géologie des chimistes et des physiciens qui prend la relève

Avec la découverte puis la maîtrise des RX qui permet l'exploration intime des atomes composant les cristaux, la question de l'énigme de la matière passe d'un objet du géologue à celui du chimiste puis du physicien.

Resteront au géologue, la prospection et la valorisation des matières premières. Ici, les techniques et outils géologiques sont empruntés à la physique avec la géophysique, à la chimie avec la géochimie, à la métallurgie avec la minéralurgie, etc.

Comme on le voit, l'évolution des idées et techniques géologiques est bien la même que celle des découvertes scientifiques avec ses 3 composantes indissociables que sont, les idées, les techniques les outils.

Mais ces idées, d'où viennent-elles, comment se forment-elles ? Quel est le chemin que doit parcourir la pensée pour se forger une représentation du monde cohérente, la plus proche possible de la réalité et partagée par tous aujourd'hui ?

Comment la pensée scientifique a-t-elle pris en charge l'objet de la connaissance de la terre.

Comment cette prise en charge a-t-elle permis la construction des connaissances de la nature et de l'histoire à travers la multiplication des disciplines géologiques et des idées qu'elles amènent?

Et enfin quand, comment et où, et avec quels outils, cette prise en charge a-t-elle conduit les géologues au modèle actuel de représentation de la Terre

Pour cela nous rappellerons d'abord ce qu'est la science, sa définition, son objet, ses contraintes et sa puissance

Ensuite comment les sciences géologiques s'inscrivent dans ce cadre scientifique

Enfin, en partant du modèle actuel de la Terre en tant qu'objet de connaissance des sciences géologiques, nous allons essayer de comprendre, en remontant le temps, comment de découverte en découverte, d'hypothèses en hypothèse, d'erreurs en erreurs, de controverses en controverses, la connaissance géologique s'est rapprochée de plus en plus du modèle actuel en attendant de nouvelles découvertes,

1. Des sciences
2. Des sciences géologiques
3. Modèle actuel, son argumentaire, sa construction historique

1 DES SCIENCES

Définitions

Sciences = discipline de pensée qui prend en charge la compréhension des objets réels ou théoriques selon une méthodologie stricte et universelle basée sur le principe de causalité ou plus simplement = connaissance exacte de quelque chose (*planche 1*)

Une Connaissance exacte qui ne traite que d'objets connaissables, et qui exige de préciser la nature de l'objet connaissable - concret, - abstrait, concept, théorie, modèle ainsi que la méthodologie scientifique utilisée pour acquérir cette connaissance.

Méthodologie scientifique

Une connaissance n'est scientifique que si elle est le résultat d'une pensée (démarche intellectuelle) scientifique avec ses conditions méthodologiques = stades opératifs:

1. Modèle de référence à un temps donné
2. hypothèses nouvelles, pouvant être émises dans n'importe quel lieu
3. expérimentation selon protocoles scientifiques normalisés, (résultats mesurables et reproductibles)
4. réfutation ou confirmation des résultats, par toute la communauté scientifique du domaine de l'objet de connaissance
5. proposition éventuelle d'une nouvelle théorie voire d'un nouveau modèle de référence

Ce mode d'opération garanti :

- que toute connaissance scientifique est universelle,
- qu'un résultat scientifique est prédictible
- que toute connaissance scientifique est perfectible,
- que toute connaissance scientifique est à l'abri d'un dogme scientifique sur le long terme

La connaissance exacte de quelque chose permet :

- d'établir des liens entre les humains dans l'espace (la vérité scientifique est valable dans toutes les régions et dans toutes les langues et cultures) ainsi que dans le temps (héritages scientifiques)
- de réunir les humains autour d'objets de vérité partagés
- de progresser dans la connaissance exacte de notre environnement

La connaissance exacte exige des efforts, une liberté totale de pensée et en particulier de retenir que :

La paresse de la pensée conduit au rapport magique aux choses et que ce rapport entraîne la peur. Copier ou réciter n'est pas penser

La connaissance exacte progresse d'insuffisances en en insuffisances mais se rapprochant toujours plus près de la connaissance vraie à chaque nouvelle découverte, hypothèse ou idée

Toute connaissance inexacte divise

La démarche scientifique peut être empirique, se déroulant de l'observation aux lois et aux modèles, ou partir d'un modèle théorique existant avec ses lois pour le tester à la suite d'une découverte ou d'une nouvelle hypothèse

Les deux démarches sont recevables si elles respectent la méthodologie scientifique (= avec la rigueur d'une expérimentation normalisée, dont les résultats seront mesurables, vérifiables et réfutables)

2 LES SCIENCES GEOLOGIQUES

Le champ des connaissances scientifiques est vaste et différentes propositions de classement des disciplines ont été proposées. Parmi toutes celles qui existent nous retenons celle qui classe la géologie parmi les sciences de la Nature, (Natural science en anglais), qui ont pour objet le monde naturel, la Terre et l'Univers, par opposition aux sciences humaines qui sont celles dont l'objet d'étude est l'Homme, son histoire, ses cultures, réalisations et comportements.

2.1 : LES DISCIPLINES GEOLOGIQUES SONT ELLES SCIENTIFIQUES ?

Regardons si la nature des objets et la méthodologie répondent aux critères de scientificité

Les objets géologiques sont connaissables :

- **Objets concrets**, matière =minéraux, roches, magmas, pierres, fossiles, couches,
- **Objets abstraits** (= concepts): concepts des causes anciennes ≠ et actuelles ; doctrines du catastrophisme ≠ transformisme, théories de l'évolutionnisme ≠ fixisme, continents et Terres fixes, orogénèse statique ≠ déplacement des montagnes et continents, modèles des terre creuses ≠ terre pleines etc.
- **Phénomènes, mécanismes** = érosion, transports, sédimentation, volcanisme, magmatisme, déplacements, plissements, cycles des roches, géodynamique interne convection, etc.

Tous les objets géologiques abstraits sont connaissables et raisonnables, réfutables et améliorables

Méthodologie

- **Méthodologies géologiques** : Observation, identification, classement, interprétation, théorisation, modélisation, réfutations, dans toutes les disciplines géologiques : pétrologie, paléontologie, géochronologie, vulcanologie, sédimentologie, etc.
- **Techniques et Outils** : instrumentation normalisée de la physique, chimie, tectonique, mécanique cristallographie, géodésie, cartographie, microscopes, scanners, GPS, etc.,
- **Modèles géologiques** : validité temporaire, réfutable, et toujours perfectible
- **But** de ces connaissances : comprendre le fonctionnement du Globe terrestre et optimiser les ressources

Objets et méthodologie géologiques répondent bien aux critères de la scientificité d'une connaissance exacte

Caractéristiques des techniques et méthodes des disciplines à la croisée d'autres disciplines

A coté des outils et techniques classiques des disciplines géologiques fondamentales toujours employés sur le terrain tels que l'observation, l'échantillonnage, détermination, classement,

analyse, interprétation, apparaissent des outils et techniques de plus en plus sophistiquées des disciplines « dures »

- Outils pétrologie = microscopes optiques, diffractomètres, microsondes, analyses physico-chimiques ;
- Outils de Paléontologie et paléoclimatologie = amélioration des critères de classification et des méthodes d'analyse de ces données fondée sur mathématiques, statistiques et informatiques
- Outils de géochronologie = stratigraphie, radio datations
- Outils de la représentation = catalogues, encyclopédies, collections minéralogiques, paléontologiques, cartographiques

2.2 : EVOLUTION DES SCIENCES GEOLOGIQUES

Echelles d'observation

Au départ, la **géologie historique** a inventorié, trié, classé tous les indices et preuves d'évènements passés. Ces données transmises par la « mémoire » de la Terre constituent les archives à partir desquelles le géologue tente **une reconstitution** de l'histoire de la Terre.

Par la suite, avec l'évolution des outils de la chimie pour la minéralogie, et de la physique les modélisations ont pris de plus en plus de place. Mais les échelles d'observation se sont également multipliées : de l'échelle atomique dans les réactions métamorphiques à l'échelle continentale de la tectonique des plaques.

Ces écarts d'échelle d'observation accompagnés de démultiplication de disciplines et spécialités, nécessitent aujourd'hui une **approche multiscalaire** en même temps que pluridisciplinaire donc d'équipes de recherche.

Apport des autres disciplines et tentatives de modèles simplifiés

Le travail traditionnel de terrain, qui a permis tant de découvertes, se complète désormais de nouvelles méthodes d'investigation physiques et chimiques (sismographie, gravimétrie, paléomagnétisme, géochimie de l'iridium etc..).

L'apport de ces dernières disciplines tend à chercher à simplifier au maximum et à théoriser les modèles géologiques, (exemple des modèles successifs de la tectonique des plaques élaborés par les physiciens. Or le nombre de facteurs et phénomènes géologiques mis en jeu dans la réalité de la géodynamique interne, (on appelle cela la contingence des phénomènes géologiques), oblige à conserver une démarche empirique, c'est-à-dire de prendre en considération, l'observation des faits lors de toute théorisation.

Contingence = Terme désignant la possibilité, éventualité qu'une chose arrive ou n'arrive pas.

Dans les disciplines géologiques, le cycle méthodologique de la science doit continuer de fonctionner (=observations, hypothèses, mesures, expérimentations, vérifications, réfutation ou contestation), car c'est ce qui a permis à la géologie d'évoluer de doctrines en doctrines tout au long de son histoire malgré quelques freins dogmatiques souvent extérieurs à la géologie elle-même.

Mais quelle que soit la technique employée, la méthodologie qui conduit de l'observation au modèle est celle de l'empirisme des origines. La géologie reste bien une science empirique

2.3 DISCIPLINES GEOLOGIQUES

La *géologie* est la science qui, historiquement, s'occupait de la description et de l'histoire des couches externes de la Terre. Elle s'intéresse traditionnellement à la composition, à la

structure et à l'évolution de la surface et des couches superficielles de la croûte qui, au cours des processus géologiques, sont tantôt enfouies sous la surface, tantôt exposées à la surface.

Depuis le milieu des années 1960, avec l'avènement de la *tectonique des plaques*, les géologues ont trouvé un cadre plus général et plus approprié dans lequel placer et interpréter leurs observations.

Le résultat en est que les géologues s'intéressent maintenant aussi à des zones plus profondes de la croûte et du manteau de la Terre, qui avant 1965 furent essentiellement l'objet d'étude des géophysiciens.

Cependant, si les géologues tiennent compte dans leurs modèles géologiques des acquis de la géophysique interne, qui fait appel à des modèles physiques suffisamment simples pour être mis en équations et dégager des résultats quantitatifs, leurs modèles géologiques sont souvent assez complexes mais restent qualitatifs. C'est la conséquence de la contingence en géologie

Les sciences géologiques sont organisées à l'échelle mondiale dans *l'Union internationale des sciences géologiques*, comprennent plusieurs disciplines qui se recoupent et souvent indissociables :

1. la **géologie** proprement dite et la **géologie physique**, qui décrit en termes géologiques la vision que la géophysique fournit de la Terre ;
2. la *géologie structurale* ou *tectonique*, dont le pendant géophysique est la *tectonophysique* (tectonique), est la science qui étudie les déformations de la Terre et les structures de l'écorce terrestre produites par des mouvements orogéniques, éventuellement par les mouvements des plaques terrestres ;
3. la *paléontologie* étudie les *fossiles*, c'est-à-dire les restes fossilisés des nombreuses formes de vie ayant peuplé la Terre dans le passé et fournit les bases pour comprendre l'évolution de la vie ; en toute objectivité, il convient de considérer que sans la paléontologie et la *stratigraphie* qui en découle, la *géologie* n'aurait probablement jamais vu le jour ;
4. la *sédimentologie* étudie les phénomènes d'érosion des roches et le dépôt des débris sous forme de sédiments, la transformation de ces derniers par *diagenèse* en roches sédimentaires compactes, et la succession des diverses strates sédimentaires dans le temps et dans l'espace ;
5. la *pétrologie* ou la *péetrographie* constituent la science des roches ; elles s'intéressent à l'origine, à la formation et à l'évolution des roches, ainsi qu'à leur description, à leur texture et à leurs propriétés ;
6. la *minéralogie* étudie la nature, la composition et la structure cristalline des minéraux et se rattache à la fois à la géologie et à la *cristallographie*, cette dernière faisant partie de la *physique* ;
7. la *géomorphologie* s'intéresse à l'origine et à l'évolution du relief, et plus particulièrement aux processus qui interagissent en façonnant les paysages, à toutes les échelles de temps et d'espace, sur l'interface entre la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère ; le plus souvent, on range la géomorphologie parmi les sciences géographiques plutôt que géologiques, car c'est l'une des branches de la *géographie physique* ;

8. *l'hydrogéologie* étudie les aspects géologiques de *l'hydrologie*, cette dernière étant plutôt classée parmi les sciences géophysiques (sciences des couches-limites) ; elle possède de nombreuses relations avec la *karstologie*, science qui traite des milieux karstiques, de la formation des grottes et de la circulation des eaux souterraines ; les connaissances acquises en karstologie et en hydrogéologie sont en grande partie le fait de la spéléologie (exploration des grottes souterraines), laquelle reçoit en retour des informations très précieuses de ces sciences ;
9. la *limnologie* s'intéresse à l'étude des eaux continentales et des organismes qui y vivent ; elle concerne à la fois les sciences géologiques et les sciences biologiques ; de même, la *pédologie*, qui constitue la science des sols, est une discipline aux frontières de la géologie (étude de l'altération des roches, évolution mécanique et chimique des sols) et de la biologie (rôle des organismes dans l'altération de la roche mère et l'évolution du sol) ;
10. la *volcanologie* étudie la nature physico-chimique des volcans et leur dynamique propre ; on la classe à la fois parmi les sciences géologiques et parmi les sciences géophysiques, de même d'ailleurs que la *géochimie* qui étudie la composition chimique des roches, que ce soit en éléments majeurs ou en éléments traces, ainsi que la *géochronologie* qui permet, grâce à diverses méthodes radiométriques, de dater une roche ou un de ses constituants.
11. la *pédologie* (sciences du sol) étudie les différents composants du sol, leurs caractéristiques morphologiques, minéralogiques, physico-chimiques.
12. Géologie appliquée ou géologie de l'ingénieur, regroupe toutes applications pratiques de toutes les autres branches de la géologie, (mines, pétrole, travaux publics, hydrogéologie, etc.)

24 CONCLUSION

Géologie = SCIENCE au centre de croisement de disciplines scientifiques qui traite des objets connaissables mais souvent absents sur l'échelle des temps géologiques, lacunaire dans le temps et l'espace.

Elle propose des théories et modèles contestables et contestés : Terre plate, Terre ronde, Terre creuse, Terre pleine, origine océanique, magmatique, etc.,

Tous ces modèles ont été réfutés et remplacés par des théories et modèles de plus en plus réalistes mais toujours soumis à la nature contingente des processus géologiques nombreux et complexes.

3 MODELE GEOLOGIQUE ACTUEL ET SA CONSTRUCTION HISTORIQUE

On va illustrer le caractère scientifique de la pensée géologique à travers le modèle de représentation de la Terre et ses remises en question successives au fur et à mesure des découvertes scientifiques la plupart du temps dans les disciplines scientifiques plus fondamentales. Mais voyons d'abord, ce qu'il en est du modèle actuel et des questions en suspens

3.1 MODELE ACTUEL DE LA TERRE

UNE PLANETE

Planète : La Terre est la troisième planète du Système solaire par ordre de distance croissante au Soleil, et la quatrième par taille et par masse croissantes. Il s'agit de la plus grande et la plus massive des quatre planètes telluriques, les trois autres étant Mercure, Vénus et Mars.

Origine : accréation de poussières minérales sur une orbite d'un nuage solaire

Nature : planète tellurique, c'est-à-dire une planète rocheuse à noyau métallique, avec une magnétosphère, une hydrosphère et une atmosphère

Caractéristiques : la plus grande taille, la masse volumique globale la plus élevée, la plus forte gravité de surface, le plus puissant champ magnétique global, la vitesse de rotation la plus élevée, des 4 planètes telluriques du Système solaire

Age : = 4,54 milliards d'années

Apparition de la vie : 3,8 Ga sous forme d'archèes et de bactéries dans l'océan

UN GLOBE ET UNE COMPOSITION CHIMIQUE

Forme = ellipsoïde, (sphère aplatie aux pôles), rayon moyen de 6370m

Masse volumique = 5,5

Composition chimique totale : O>30%, Si>15%, Mg<14%, S, Ni, Ca, Al, Na, K,).

Composition chimique du noyau : fer (<90%), nickel (<6 %), soufre (4,5 %), < 1 % autres

UNE STRUCTURE EN ENVELOPPES

3 discontinuités physique majeures = Mohorovicic, Gutenberg, et Lehmann séparant **4 enveloppes minéralogiques**, croûte, manteau, noyau externe et noyau interne

Une discontinuité

Compositions minéralogiques :

Croûte océanique : basalte, gabbro,

Croûte continentale : granite, et roches métamorphique

Manteau sous le Moho : péridotite avec olivine comme minéral principal,

Noyau de fer en fusion sous la discontinuité de Gutenberg

Noyau de fer cristallisé sous la discontinuité de Lehmann

Forme minéralogique : forme cristallisée dans la lithosphère, le manteau et la graine du noyau, sous forme liquide dans le noyau externe et les laves en fusion, amorphes dans volcanisme effusif,

COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES ENVELOPPES

Lithosphère rigide (100km) = croûte + partie rigide du manteau supérieure ;

Manteau plastique de très grande viscosité (2900km),

Noyau externe liquide ; noyau interne ou graine solide

UNE GEODYNAMIQUE EXTERNE ET INTERNE

Existence d'un cycle **érosion** sédimentation, enfouissement, métamorphisme en surface

Existence de **mouvements horizontaux** et plongeants de plaques tectoniques rigides (lithosphères) =tectonique des plaques

Existence de **mouvements verticaux** de matière mantellique par convections cellulaires dans le manteau

Existence de mouvements plus complexes dans le noyau extérieur

Moteur des mouvements= gradients géothermiques et gravitaires voir SCHEMA ANNEXE1

3.2 MODELE GLOBAL ARGUMENTÉ

321 COMPOSITION ET STRUCTURE EN ENVELOPPES

Arguments astrophysiques, et de la planétologie : pour la nucléosynthèse, l'origine, la place orbitale, l'accrétion de poussières minérales, la différenciation en enveloppes

Arguments géodésiques : pour les mesures, (dimensions, densité),

Arguments de la météorologie, de la télédétection satellitaire, de la géophysique : pour la structure en enveloppes de la magnétosphère, atmosphère, hydrosphères, jusqu'aux enveloppes minérales internes.

Arguments sismiques : pour la structure en enveloppes minéralogiques du globe terrestre :

La structure interne de la Terre, la nature ainsi que l'état et la densité de la matière, ont été déduits des lois de la propagation des ondes sismiques dans un milieu physique

Tout changement de vitesse correspond à un changement de nature minéralogique ou de propriété rhéologique. Cette méthode est la seule actuellement permettant de déterminer l'état de la matière à des profondeurs inaccessibles à l'observation directe.

Exemple : la discontinuité de MOHO correspond à changement minéralogique séparant les granites ($V_p=6$ km/s)et les basaltes ($V_p 6,5$ km/s) de la croûte de la péridotite ($V_p= 8$ km/s) du manteau supérieur

322 GEODYNAMIQUES EXTERNES ET INTERNE

Arguments de la géodynamique externe et interne

Observations directes en surface : pour les processus d'érosion, de transport et de sédimentation des roches de surface, et les cycles des roches en surface, (Avicenne, Hutton), et aussi pour les mesures des vitesses de **déplacements horizontaux** des plaques lithosphériques par des outils de l'interférométrie radar différentielle et pour dresser des cartes

Observations directes et indirectes des mouvements verticaux des profondeurs: par l'étude des enclaves de péridotites amenées par les volcanismes profonds ,

Etablissement de profils géothermiques, des densités, des pressions : par mesures directe pour les 1^{ers} km de la croûte et indirectes grâce à l'interprétation des profils sismiques pour les enveloppes plus profondes

Géométrie de la convection : par comparaison de modèles théoriques avec des cartographies par tomographie sismique en 2D, ces modèles se rapprochant de plus en plus de la réalité.

Reconstitution des mouvements anciens des plaques. Géomagnétisme et enregistrement de l'expansion des fonds océaniques

Les positions des plaques et leurs mouvements passés relatifs sont simulés, grâce à la mémoire géomagnétique des minéraux et l'exploitation informatique des bases de données paléontologiques et paléogéographiques. Il est également possible d'améliorer la reconstitution des paysages anciens, (supercontinent, périodes glaciaires, crises écologiques, etc.)

Mais pour arriver à ce stade de modélisation, il a fallu pour les géologues, déchiffrer, synthétiser de nombreuses informations venues de disciplines les plus diverses pour adapter à la géologie des modèles souvent construits par des non géologues. C'est ce que montre la brève histoire des modèles de la Terre qui suit

3.3 MODELE GLOBAL CONSTRUCTION HISTORIQUE

C'est surtout à partir du 18^{ème} siècle, que les découvertes et techniques scientifiques ont suffisamment convaincu les savants pour libérer leur imagination et conduire modèle après modèle à celui d'aujourd'hui.

En effet, le modèle d'Aristote, (IV^{ème} siècle av. J.-C.), dominait toutes les représentations et cohabitait avec celui figé, des dogmes religieux. Aristote décrit une Terre formée de l'élément terre entourée d'eau, puis d'air et enfin d'une couche de feu, au-delà de laquelle, c'est le monde des astres et de l'éternité. La partie superficielle du globe contient des cavités internes et des canaux. Le vent (ou souffle interne), sortant des cavités, provoque des tremblements de terre. Lorsqu'il est broyé en petites particules, il prend feu et donne des volcans. Ces éléments se retrouveront dans tous les modèles géocentriques jusqu'à Copernic.

Il faut attendre les voyages de la fin du 15^{ème} et surtout du 16^{ème}, qui en obligeant au développement de nouveaux outils d'observation et de mesure, vont conduire à de nouveaux concepts dans la manière de regarder le monde :

1543 : *Des révolutions des sphères célestes*, de **Copernic**, remplace le géocentrisme par l'héliocentrisme. La Terre devient un objet d'étude désacralisé, banal, accessible à l'étude.

1687 : *Principia*, de **Newton** sur la loi de gravitation, consacre cette accessibilité en posant la question de la forme de la Terre, de sa structure pleine, de l'origine des roches, question qui occuperont une grande part des débats scientifiques de la **fin du 17^{ème} siècle à la fin du 18^{ème}**

Mais c'est à partir du 18^{ème} siècle, que 2 faits vont encadrer l'imagination des « scientifiques naturalistes », dans la conceptualisation des modèles de la Terre

- Dans les années **1730-1740**, les idées de Newton s'imposent en France et avec BUFFON, *la terre devient pleine* et mesurable
- Dans les **années 1820**, avec Fourier, la démonstration du flux géothermique est faite : *la croûte terrestre enveloppe probablement des masses fondues*, en tout cas très chaudes.

1778 : *Une histoire du monde* de **Buffon**, ouvre la voie à l'idée d'un temps long pour l'âge de la Terre

Parallèlement, les connaissances des sciences biologiques font des progrès permettant de s'interroger sur les formes biologiques anciennes

1808-09 : *Anatomies comparées de Cuvier* et *Histoire naturelle des animaux sans vertèbres* de Lamarck, sont le fondement de la Paléontologie et de l'Evolution de la Vie sur Terre

Ces nouvelles idées vont se traduire dans les trois aspects de la construction du modèle géologique

331 Nature des roches rencontrées en surface

Les 3 grandes familles de roches sédimentaires, magmatiques et métamorphiques ont été définies sur une période de temps relativement courte dès lors que les outils d'observation et d'analyse ont été disponibles, entre 1790 et 1830, par Werner, Hutton puis Lyell. En même temps chacun de ces savants a développé

1556, *De re metallica* de Georg Bauer dit Georgius Agricola (1494–1555) qui résume les connaissances minières et métallurgiques de son temps

1749-1817 : Werner père du Neptunisme, théorie qui considère que l'origine des roches est la précipitation dans l'eau. A partir d'un inventaire considérable et minutieux des roches sédimentaires, il propose une colonne lithologique universelle.

Werner père des roches sédimentaires mais qui ignore les roches d'origine magmatiques
1795, "Theory of the Earth", de Hutton, père du plutonisme qui considère que l'origine de nombreuses roches est d'origine magmatique.

Hutton père des roches magmatiques et de la notion de cycle des roches

1834 : " (*Principles of Geology*)" de Charles Lyell est considéré comme un des pères fondateurs de la **géologie moderne** avec le "principe des causes actuelles" qui devient transformisme progressif.

Lyell, père **des roches métamorphiques** comprises comme la transformation des roches anciennes. Le transformisme englobera l'évolution des espèces de Lamarck et deviendra le socle de théorie de l'évolution de Darwin

332 Structure

En surface : la structure en couches à la surface du globe est expliquée et théorisée par Stenon avec les principes de la stratigraphie dès le milieu du 17^{ème} siècle.

1660, principes de la stratigraphie, Stenon : les principes de continuité et superposition, horizontalité expliquent les rapports géométriques. La Terre est creuse et toute rupture explique le basculement des couches

En profondeur : il faudra attendre le début du 20^{ème} siècle avec la sismologie pour avoir une idée précise de la structure en enveloppes de l'intérieur de la terre bien que la notion de couches est très ancienne (4 principes de la matière d'Aristote, terre, air, eau, feu).

1778, une histoire du monde de Buffon. La Terre et les planètes sont pleines et prennent leur forme en état de fusion (par arrachement d'un jet de matière du soleil suite au passage d'une comète); la Terre se consolide en une grande masse vitreuse, que l'on retrouve dans le "noyau des grandes montagnes", sortes de "boursoflures"; Buffon peut calculer le temps de refroidissement de la Terre. C'est la double rupture avec le diluvianisme et le temps court de la Terre

1862 : Lord **Kelvin** (1824-1907), défend avec vigueur une Terre entièrement solide plutôt qu'en fusion, car sinon la masse fluide interne devrait subir des marées importantes, exactement comme les océans de la surface. Et ces marées internes devraient déformer

intensément le sol, le soulever et l'abaisser alternativement, ce qui n'arrive pas. La Terre se comporte comme un solide élastique

1881, Albert Roche, présente un modèle de Terre avec un noyau ferreux dont la densité est voisine de 7, recouvert d'une couche pierreuse de densité 3, dont l'épaisseur n'atteint pas 1/6 du rayon entier.

1909, Eduard Suess reprend les modèles des densités de **Albert Roche** et de **Emil Wiechert (1897)** et dénomme le noyau **NiFe**, le manteau **SiMa** et la croûte **sial**

En 1909, Mohorovicic observe un accroissement des vitesses sismiques sous la Croatie à environ 54 km de profondeur. Cet accroissement confirmé par d'autres sismologues dans différentes régions du monde, est interprété comme l'interface entre la croûte et le manteau.

En 1912, Gutenberg repositionne la discontinuité d'Oldham vers 2900 km de profondeur (qui est la valeur adoptée de nos jours sous le nom de discontinuité de Gutenberg ou *couche D*)

En 1936, Inge Lehmann découvre que le noyau liquide de la Terre contient une partie centrale distincte solide : la graine.

333. Les mouvements horizontaux et verticaux : la tectonique des plaques

Les mouvements observables à l'échelle humaine, ont de tout temps attiré la curiosité des savants de l'époque. Certains, le plus souvent cycliques et prévisibles, pour être exploités telles que les crues et les marées, d'autres pour construire des mythes, dès lors qu'ils surprenaient par leurs soudaineté et leurs violence, tels que les éruptions volcaniques, séismes, tsunamis ou crues exceptionnelles.

Ces mouvements avaient pourtant questionné sur leur ampleur sur le long terme. Comment expliquer la présence de fossile au sommet d'une montagne, ou le souvenir de séismes passés consignés dans la mémoire légendaire ou des écrits historiques approximatifs

Jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle, les seuls mouvements horizontaux acceptés étaient ceux des plissements de type alpins, avec des théories controversées sur poussées lointaines ou de proximité car l'isostasie était la principale force connue

Il faut attendre la théorie de la tectonique des plaques à la fin des années 1960 pour donner un cadre cohérent et global au pourquoi de ces mouvements. Ce modèle qui est le cadre universellement admis pour décrire tout phénomène géologique a du franchir plusieurs obstacles avant de s'imposer.

1912 : « derive des continents » Wegener expose sa théorie en l'argumentant de nombreux faits cartographiques et géologiques. Mais il ne peut donner le moteur de ces déplacements. Sa théorie est rejetée.

Apports des gradients géothermiques. Convection dans le manteau ?

1934 : Le géophysicien Maurice Ewing applique les méthodes sismiques à l'exploration des fonds océaniques. C'est le début de la topographie du fond des océans. Les dorsales et fosses océaniques, montrent des flux de chaleurs très différents, 2 à 8 fois plus élevé sous les dorsales et 10 fois moins au niveau des fosses océaniques

1937 : "*Our wandering continents*". Le géologue Sud-africain Alex Du Toit relance la théorie de la dérive des continents en remplaçant **la Pangée** de Wegener, par deux grands blocs continentaux, l'un nordique, la **Laurasie** et l'autre méridional, **le Gondwana**. Mais lui non plus ne peut expliquer le moteur de ces déplacements

1945 Arthur **Holmes** reprend sa vieille idée des courants de convection provoqués par la chaleur radioactive accumulée à l'intérieur de la Terre et leur donne le pouvoir de fragmenter un continent primordial. Les fragments s'écarteraient jusqu'à ce qu'ils soient entraînés par un courant descendant au niveau des fosses océaniques

1960 : hypothèse de l'expansion des fonds océanique. **Hess** reprend le modèle de **Holmes** en qualifiant les dorsales d'indicateur de **courants ascendants** et les fosses océaniques des courants descendants. La croûte océanique est créée au niveau des dorsales et enfouie au niveau des fosses océaniques. La croûte océanique était continuellement recyclée alors que la croûte continentale, à cause de sa légèreté, était condamnée à dériver à la surface de la Terre.

Apports du géomagnétisme

1963 : **Morley, Vine** et **Matthews** interprètent les anomalies magnétiques découvertes sur le plancher océanique comme des marqueurs de l'expansion. Ces anomalies **se traduisent** par des bandes alternativement positives et négatives, disposées parallèlement et symétriquement par rapport aux dorsales. L'âge des terrains est de plus en plus ancien au fur et à mesure que l'on s'éloigne des dorsales

En 1966, Vine et **Tuzo Wilson** calculent le taux d'ouverture des océans et datent la croûte océanique. Cette datation fut confirmée par des forages réalisés en 1968.

Apports de sismologie

Wadati en 1930 et **Benioff** en 1955 avaient remarqué que les séismes profonds situés sous les fosses se localisaient suivant des plans inclinés et à l'exception des fosses où les tremblements de terre existaient jusqu'à 700 km de profondeur, les séismes étaient également restreints à la partie superficielle du globe, à une profondeur inférieure à 100 km. Cette partie superficielle constituait la lithosphère, couche au comportement rigide, qui surmontait l'asthénosphère, couche au comportement ductile

1954 : La carte de la répartition des séismes établie par **Beno Gutenberg** et **Charles Francis Richter** montrent que les séismes étaient confinés dans des régions précises correspondant aux dorsales, aux fosses, aux failles transformantes et aux chaînes montagneuses.

En 1967, Jack Oliver et Bryan Isacks interprétèrent ces plans comme la trace de la lithosphère océanique retournant dans le manteau = « zones de subduction »)

En 1967, Jason Morgan synthétisa ces différentes approches, développa la première hypothèse « plaquiste » et proposa une méthode géométrique pour décrire les déplacements.

En 1968, Xavier Le Pichon, appliqua la méthode, divisa la surface du globe en 6 plaques lithosphériques dont et calcula leur mouvement relatif depuis 120 millions d'années.

En 1968, **Isaks, Jack Oliver** et **Lynn Sykes** parlèrent de « nouvelle tectonique globale » en vérifiant qu'elle était conforme aux phénomènes sismiques, et **Vine** et **Hess** introduisirent l'expression « tectonique des plaques ».

En 1968, Lynn Sykes Vine et **Hess** introduisirent l'expression « tectonique des plaques ».

34 RESISTANCES ET QUESTIONS EN SUSPENS

RESISTANCES GEOLOGIQUES

Le modèle global d'une terre à enveloppes, à géodynamique interne par convection et une tectonique des plaques, furent rapidement adoptés par les géophysiciens car il leur a permis d'interpréter l'ensemble de leurs nouvelles observations. Curieusement ce modèle se heurta à

une forte opposition de la part des géologues qui la considéraient avant tout comme une *théorie des océans* et qui ne tenait pas compte de la contingence.

Son application à la géologie continentale posait, il est vrai, de sérieuses difficultés :

- comment l'utiliser pour comprendre le passé géologique ?
- Les plaques étaient-elles vraiment rigides alors qu'on observait des séismes intra-plaques par exemple en Asie ?
- Comment définir une frontière entre deux continents alors que les séismes se répartissaient sur une large bande ?

John Dewey et **John Bird**, en 1969-70, furent les premiers à montrer la fécondité de la théorie de la tectonique des plaques pour comprendre les formations géologiques en définissant les marges continentales passives, les marges continentales actives, les chaînes de collision. Ils affirmèrent également que les *montagnes anciennes résultaient d'anciennes collisions et étaient donc les témoins d'océans aujourd'hui disparus*. La tectonique des plaques pouvait donc avoir une application antérieure à 200 millions d'années.

Leur classification des formations géologiques restait encore rudimentaire, mais ils montraient que la tectonique des plaques pouvait être un cadre unificateur général dans lequel les investigations géologiques pouvaient être reprises, les faits observés réinterprétés, l'histoire du globe et des continents redécouverte.

Ils permirent à une *nouvelle géologie de se développer, en association avec les études chimiques, thermiques et dynamiques*, afin de définir et de comprendre la genèse et l'évolution des différentes structures de la surface du globe, tant océaniques que continentales. La dimension cinématique à grande échelle de cette théorie pouvait effrayer les géologues de terrain. Mais avec l'arrivée des cartographies satellitaires et des traitements des bases de données pluridisciplinaires par l'outil informatique, le géologue découvre des perspectives de compréhension entièrement renouvelé de la surface du globe en *lui redonnant son unité* et en révélant les *échanges de matière entre l'intérieur et l'extérieur de la planète et la nécessité de l'existence de courants de convection dans le manteau*. Elle définit ainsi un nouveau cadre pour expliquer les formations géologiques.

RESISTANCES SUR L'AGE ET L'IDEE D'EVOLUTION DE LA TERRE

AGES DE LA TERRE

18^{ème} : siècle de la mesure, outils de la gravitation, géodésie, découverte et mesure du gradient géothermique, compréhension des mécanismes de refroidissement par conduction, repris par neptunisme, plutonisme pour l'origine des roches, et par Buffon pour un premier temps long,

Fin 18^{ème} : essor de la taxinomie, stratigraphie, paléontologie,

Buffon : Age de la Terre = 75000ans

19^{ème} : siècle de la chronostratigraphie, et de la thermodynamique

Lyell et Darwin : Age de la Terre > 250 Ma

Kelvin : Age de la Terre = 20 Ma

20^{ème} : siècle de la radioactivité

Rutherford : Age de la Terre > 700 Ma

Patterson : Age de la Terre >4,55 Ga

L'acceptation des ces dates successives ne s'est pas faite sans grandes résistances

D'abord celle des religions qui refusent les modèles de création autres que celles des miracles de Dieux
Ensuite celle de certains scientifiques eux-mêmes (et parmi les plus grands) qui attendent des preuves irréfutables des datations proposées

AGES GEOCHRONOLOGIQUES SUCCESSIFS DE LA TERRE

1650: USSLER: LA TERRE **BIBLIQUE S'OPPOSE** → 23 OCTOBRE -4004

1770: BUFFON: LA TERRE REFROIDIT → 75 000 ANS

1859: DARWIN: GEOL → 300 MILLIONS MAIS **KELVIN S'OPPOSE**

1862: KELVIN: sans source de chaleur continue, LA TERRE REFROIDIT → 98 MILLIONS

1904: RUTHERFORD: RADIOELEMENT → > 700 MILLIONS

1946: HOLMES : U/Pb → > 3 MILLIARDS SUR ROCHES TERRESTRES

1953: PATTERSON: U/Pb SUR METEORITE → ≈ 4,55 MILLIARDS

RESISTANCE DES DOGMES CONTRE L'EVOLUTION DE LA TERRE ET DE LA VIE

STRUCTURE : TERRE CREUSE, TERRE PLEINE, THEORIES

- RESISTANCE DES DOGMES RELIGIEUX contre l'HELIOCENTRISME: GIORDANO BRUNO
- RESISTANCE DES DOGMES SCIENTIFIQUES: KELVIN, MENDELEIV, EINSTEIN

FIXISME ET CATASTROPHISME/TRANSFORMISME ET EVOLUTION : BIBLE, NEPTUNISME/TRANSFORMISME, METAMORPHISME ET EVOLUTION

TENANTS DU FIXISME : RELIGIONS, THEORIES DILUVIANISTES ET FIXISTES, CUVIER

TENANTS DE L'EVOLUTION : THEORIES TRANSFORMISTES, BUFFON, LAMARCK, LYELL, DARWIN

Le dépassement des dogmes ne peut se faire que par une pensée scientifique libérée à la fois des contraintes sociales de l'environnement proche et lointain, et des contraintes idéologiques ou de l'Ego individuelle

(VOIR CHAPITRE « METHODE SCIENTIFIQUE »)

LES GRANDES DATES DE L'HISTOIRE DE LA TERRE

4,6 milliards d'années : explosion d'une supernovae dont l'onde de choc va mettre en mouvement un nuage moléculaire de poussière et de gaz contenant du Fe, Si, Ni, Al, de 25 milliards de km diamètre

En 10 millions d'années, le nuage, en se contractant sous sa propre gravité, va accélérer sa rotation, former un disque d'accrétion et concentrer 99,9% de sa matière au centre pour former le Soleil, et le restant, les planètes du système

Rappel : âge de la Terre calculé par datation météorite = $4,55 \pm 0,07$ milliard

4,6 à 4,4 milliards : mécanisme d'accrétion de matières du nuage

A partir d'une taille de 800 m, en apesanteur, les astéroïdes accélèrent l'agglomération des grains de poussières et s'installent sur une 20aines d'orbites solaires où ils atteignent rapidement une taille de 1/10ème de celle de la Terre actuelle Ce processus a été rapide, environ 30 millions d'années

Mais ces orbites ne sont pas stables et plusieurs planétoïdes vont fusionner par collisions successives jusqu'à ce qu'il ne reste que 4 planètes sur 4 orbites dans l'environnement le plus proche du Soleil (Mercure, Vénus, Terre, Mars).

La Terre serait ainsi le résultat de l'accrétion de 8 protoplanètes et la chaleur fournie par les collisions porte à plus de 5000°C.

Cette température élevée fait fondre toutes les roches et provoque une différenciation de la matière par densité. Le fer et les atomes les plus lourds, migrent au cœur de la Terre, les éléments plus légers remontent vers la surface.

Le noyau de la terre avec sa partie externe en fusion, fonctionne comme une dynamo et crée la magnétosphère terrestre

4, 53 milliards : la dernière grande collision (8^{ème} collision) est à l'origine de la création de la Lune et faisant basculer l'axe de rotation de la Terre de 23,5 °

L'impact aurait également accéléré la rotation de la Terre en lui donnant un temps de rotation de **6 heures**, et initié la tectonique des plaques de la planète.

4, 35 milliards : un bombardement d'astéroïdes (déviés par la présence de Jupiter), riches en eau remplissent les océans.

Atmosphère riche en CH₄, CO₂, N, H₂O,

Dans les océans= hypothèse de conditions prébiotiques favorables, (eau, ammoniac, méthane et hydrogène...) à la création des 1ères molécules organiques simples (urée, formaldéhyde, acide cyanhydrique, acides aminés...).

4, 2 milliards : refroidissement de la Terre et formation des océans, riches en fer d'origine hydrothermal

De 4 à 3,8 milliards : période de grand bombardement tardif, comme la Lune et les autres corps du système solaire. Cette phase est probablement due au réarrangement du système solaire externe,

3,8 milliards : traces de carbone attribuées à 1^{ère} forme de vie (bactérie primitive). Hypothèse de vie à 4

3,5 milliards : 1^{ère} forme de vie cellulaire attestée sous forme de stromatolithes (fossiles d'Australie) et début de photosynthèse

3,5 à 2,5 milliards : tout l'oxygène libéré par les stromatolithes est capté par le fer des océans pour former oxydes qui précipitent et se déposent au fond des océans où ils vont se transformer en roches riches en Fer connues sous le nom des banded iron formations ou BIF, (Fer de Zouerate en Mauritanie)

2 milliards : oxygène augment dans les océans et dans l'atmosphère, les journées ont 16h

1,5 milliards : grande activité volcanique de points chauds et premiers déplacement de croûtes continentales et océaniques et première reconstitution des supercontinents

550 millions d'années : l'explosion cambrienne de la vie d'abord dans l'océan puis sur le continent. La paléontologie va servir à établir les échelles stratigraphiques relatives jusqu'au 20^{ème} siècle

CONCLUSIONS

RESUME DE CE QU'IL FAUT RETENIR DE LA PARTIE1.

DISTINGUER LES 3 FORMES DE PENSEES ;

- irrationnelle ou magique ;
- rationnelle non scientifique ;
- rationnelle scientifique.

COMPRENDRE

- Comment fonctionnent ces 3 formes de pensées
- Leurs rapports au progrès des connaissances scientifiques, (blocages, accélérations)

La science est la discipline de pensée qui prend en charge la compréhension des objets réels ou théoriques selon une méthodologie stricte et universelle basée sur le principe de causalité (*planche 1*)

- Appliquer la démarche scientifique à tous sujets touchant à l'objet et aux phénomènes géologiques et en particulier :
- Toujours bien définir les termes employés pour désigner les objets et phénomènes géologiques

CE QU'IL FAUT RETENIR DE LA PARTIE 2

- La géologie est une science dont l'objet est la matière minérale de la Terre, son origine, ses caractéristiques, ainsi que les processus qui expliquent sa présence dans la structure de la Terre, son évolution historique.
- De par son objet, la géologie est au carrefour de plusieurs disciplines tant physiques que biologiques d'où les nombreuses disciplines spécialisées
- La géologie est une science empirique et le restera car contingente

CE QU'IL FAUT RETENIR DE LA PARTIE 3

Un modèle cohérent et global : La structure en enveloppes et la réalité des mouvements horizontaux et verticaux

Un modèle cadre qui permet à nouveau de relier toutes les disciplines géologiques qui avaient tendance à s'isoler

ANNEXES

COMPOSITION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE

<i>en poids %</i>	Manteau	Croûte continentale	Croûte océanique	Noyau
O	44,7	46,4	43,1	5
Si	21,6	28,9	21,2	8
Mg	22,9	1,9	7,4	
Fe	5,9	5,7	8,3	80

Al	2,2	8,3	7,3	
Ca	2,3	4,1	6,8	
Na	0,2	2,3	1,6	
K	0,02	2,4	3,2	
Ni				5
S				2

Profondeur (km)	Enveloppe	Densité g/cm³
0–35	Croûte	2.2–2.9
0–100	Lithosphère	—
35–670	Manteau supérieur	3.4–4.4
35–2890	Manteau	3.4–5.6
100–670	Asthénosphère	—
2890–5100	Noyau externe	9.9–12.2
5100–6378	Noyau interne	12.8–13.1