

Géologie Générale



SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE



Shop



- Cahiers de Biologie + Lexique
- Accessoires de Biologie



Etudier



Visiter [Biologie Maroc](http://www.biologie-maroc.com) pour étudier et passer des QUIZ et QCM en ligne et Télécharger TD, TP et Examens résolus.



Emploi



- CV • Lettres de motivation • Demandes...
- Offres d'emploi
- Offres de stage & PFE

Eléments de cours de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 1

INTRODUCTION AUX SCIENCES DE LA TERRE

Définitions : la Terre et ses ressources ; aperçu sur les disciplines fondamentales et les disciplines appliquées des Sciences de La Terre.

I- NOTIONS DE BASE

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 (rocheuses), les trois autres étant Mercure, Vénus et Mars (fig.1).

Généralement les Sciences de la Terre et de l'Univers regroupent les sciences dont l'objet est l'étude la Terre (lithosphère, hydrosphère et atmosphère) et de son environnement spatial; en tant que planète,

La Terre sert de modèle à l'étude d'autres planètes dites telluriques. Depuis que des sondes spatiales permettent d'explorer d'autres objets du système solaire,

La Géologie étudie aussi la Lune, les planètes et leurs satellites naturels, les astéroïdes, les météorites et les comètes. On parle plus généralement des **Sciences de la Terre et de l'Univers**

La Terre se trouve dans la zone habitable du Système solaire; elle est principalement composée de fer (32,1%), d'oxygène (30,1%), de silicium (15,1%), de magnésium (13,9%), de soufre (2,9%), de nickel (1,8%), de calcium (1,5%) et d'aluminium (1,4%), le 1,2% restant consistant en de légères traces d'autres éléments.

La biosphère désigne toutes les formes de vie de la planète. La notion de biosphère désigne à la fois un espace vivant et un processus dynamique sur la planète Terre (depuis l'apparition de la vie il y a environ 4 milliards d'années jusqu'à ce jour),

L'hydrosphère est un terme désignant l'ensemble des zones d'une planète où l'eau est présente. Il s'agit de l'eau sous sa forme liquide (océans, fleuves, eaux souterraines..), sous forme solide (glaciers, banquise...) ou sous sa forme gazeuse (vapeur d'eau)

Le cycle géologique c'est l'enchaînement de phénomènes internes d'*orogénèse* (Formation de montagnes) et de phénomènes externes d'érosion/sédimentation, la durée se mesure en dizaines voire centaines de millions d'années, au cours de chaque cycle des reliefs ont surgi à la surface du globe, puis ont été érodés jusqu'à être aplanis (supprimés).

La géodynamique interne s'intéresse aux processus internes de la planète qui ont été à l'origine de la formation des océans et des grandes chaînes de montagnes.

La géodynamique externe s'occupe de l'évolution dynamique de la surface de la Planète. Elle s'intéresse aux paysages obtenus par les processus d'érosion et de sédimentation dans les océans, souvent causés par l'eau, la glace et le vent.

Il existe un lien certain entre géodynamique interne et géodynamique externe : la dynamique reliée à la tectonique des plaques vient souvent rajeunir les reliefs des continents;

II – LES RESSOURCES NATURELLES DE LA TERRE

Les Sciences de la Terre mettent en valeur les ressources naturelles et elles se préoccupent également de leur gestion et leur préservation de notre environnement. Une ressource naturelle est

une substance, un organisme ou un objet présent dans la nature faisant, l'objet d'une utilisation pour satisfaire les besoins. Il peut s'agir :

1. d'une matière première minérale (par exemple : l'eau douce, les granulats utilisés pour la construction, les minerais métalliques constitués de divers éléments chimiques utiles comme les métaux;
2. d'une matière d'origine vivante (ex.: la viande, le poisson, le blé, le bois.). dénommés ressources agricoles; forestières et halieutiques;
3. d'une matière organique fossile (comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel, etc .)
4. d'une source d'énergie renouvelable (énergie solaire, énergie éolienne...).

La production d'oxygène fournie par la photosynthèse (par exemple) constitue d'autres aspects des ressources naturelles.

Certaines de ces ressources ne sont pas renouvelables, comme les combustibles fossiles, (exemple: le pétrole), par opposition aux ressources renouvelables (ex. la biomasse) qui ne sont pas pour autant inépuisables.

III – LES SCIENCES DE LA TERRE

1. les Disciplines fondamentales

Les sciences de la terre ou géosciences regroupent l'ensemble des disciplines des sciences de la Terre (fig.2). Le point commun à l'ensemble de ces disciplines est l'étude du sous-sol. Classiquement, on associe aux Sciences de la Terre le terme de géologie, branche qui regroupe l'ensemble des disciplines dont la finalité est la description des objets géologiques : on y trouve d'une part l'étude des minéraux, des roches, et des fossiles, d'autre part l'étude des milieux de dépôts (sédimentologie) et des structures et déformations, (géologie structurale),...

-la *géologie structurale* ou *tectonique*, est la science qui étudie les déformations mécaniques subies par les roches, et les structures (plis et failles) de l'écorce terrestre produites par des mouvements orogéniques (formations des chaînes de montagnes), éventuellement par les mouvements des plaques terrestres, elle est à rattacher avec la Géodynamique interne ;

-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 ;

-la *stratigraphie* étudie la succession des diverses strates sédimentaires dans le temps et dans l'espace;

-la *sédimentologie* étudie les phénomènes d'érosion des roches et le dépôt des débris sous forme de sédiments, la transformation de ces derniers en roches sédimentaires compactes (Géodynamique externe) ;

-la *pétrographie* constitue 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 ;

-la *minéralogie* étudie la nature, la composition et la structure cristalline des minéraux et se rattache à la cristallographie, cette dernière faisant partie de la physique ;

-la *volcanologie* étudie la nature physico-chimique des volcans et leur dynamique propre ;

-la *géochimie* qui étudie la composition chimique des roches, que ce soit en éléments majeurs ou en éléments traces ;

-la *géochronologie* qui permet, grâce à diverses méthodes radiométriques, de dater une roche ou un de ses constituants ;

-*l'hydrologie* : Science qui traite des eaux que l'on trouve à la surface de la Terre, ainsi qu'au-dessus et au-dessous, de leur formation, de leur circulation et de leur distribution dans le temps et dans l'espace, de leurs propriétés biologiques, physiques et chimiques et de leur interaction avec leur environnement, y compris avec les êtres vivants ;

-*la pédologie* (sciences du sol) étudie les différents composants du sol, leurs caractéristiques morphologiques, minéralogiques, physico-chimiques, 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).

2. Les disciplines Appliquées

A ces disciplines fondamentales sont venues se rajouter des disciplines à caractère appliqué, on peut citer :

-*la géophysique*, qui étudie la structure et la composition interne de la Terre faisant appel à des méthodes physiques: sismiques, gravimétriques, magnétiques, électriques, électromagnétiques, appliquées à la prospection pétrolière et minière et aux études environnementales, etc.) ;

-*la géotechnique*, a pour principal objet les études de sol pour la construction d'ouvrages humains et infrastructures (pavillons, immeubles, voiries, barrages...). C'est la géologie appliquée au domaine de la construction; elle traite de l'interaction sol / structures, et fait appel à des bases de géologie, de mécanique des sols, de mécanique des roches et de structures. Elle traite également des phénomènes de mouvement de sol (glissement, affaissement et autres) ;

-*l'hydrogéologie* étudie les aspects géologiques des eaux souterraines. Elle s'occupe de la distribution et de la circulation de l'eau souterraine dans le sol et les roches, en tenant compte de leurs interactions avec les conditions géologiques et l'eau de surface ;

-D'autres techniques et moyens d'investigations sont venus compléter les études en sciences de la terre et constituent des disciplines appliquées à divers domaines des sciences notamment en sciences de la Terre :

- *L'imagerie satellitaire* et la télédétection spatiale : est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images,(à partir d'avions, de ballons ou de satellites,) d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), c'est le processus qui permet de capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter, et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette, information (Géologie, Météorologie, Océanographie, catastrophes naturelles,...) ;
- *La géomatique* regroupe l'ensemble des outils et méthodes permettant d'acquérir, de représenter, d'analyser et d'intégrer des données géographiques ;
- *Les Systèmes d'information Géographique (SIG)* : sont des systèmes informatiques de représentation de données sur l'espace spatial terrestre réel en associant *coordonnées géographiques* et données récoltées, toutes sortes de données peuvent être ainsi représentées.

Fig.2 : Les différentes disciplines des sciences de la Terre

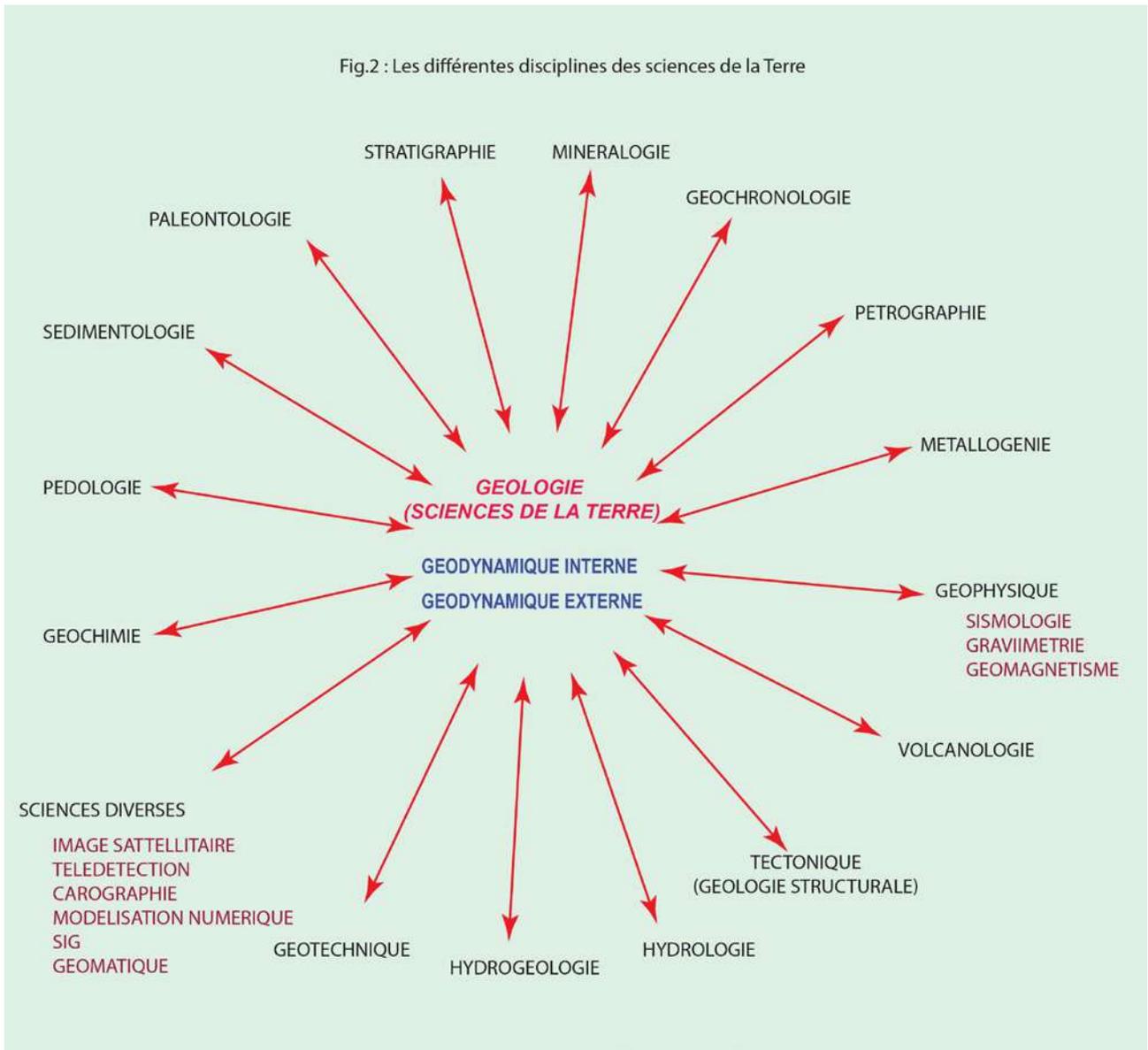


Fig.1 sera donnée pendant la séance du cours.

Liens utiles

- <http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICHYDROL.HTM>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Terre#Ressources_naturelle
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Ressource_naturelle

Éléments de cours de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 2

STRUCTURE DE L'UNIVERS

L'univers ou cosmos est l'ensemble de tout ce qui existe, inclus l'espace extraterrestre, et s'étend de l'infiniment petit à l'infiniment grand, la référence étant la taille de l'homme dont l'ordre de grandeur est le mètre (m).

La Cosmologie c'est la science qui s'occupe de l'étude de la structure, de l'origine et de l'évolution de l'univers

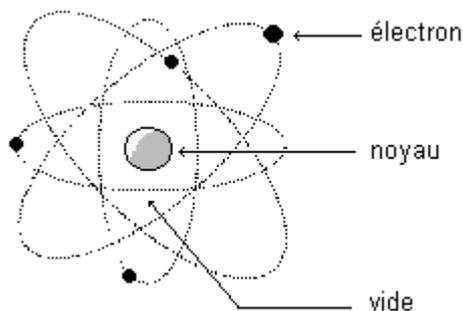
L'Astronomie est la science des corps célestes. (Céleste est un mot qui est relatif au ciel).

I – NOTIONS DE BASE

1-L'échelle des grandeurs

La matière qui nous entoure, qu'elle soit inerte ou vivante, est constituée à partir d'**atomes**. Ces derniers peuvent s'assembler pour former des **molécules**.

Les molécules peuvent s'organiser de différentes façons pour façonner la matière. Exemple des cellules qui sont constituées de molécules. La taille des cellules est comprise **entre 10^5 et 10^{-4} m**. En effet, la taille d'un noyau est de l'ordre de 10^{-15} m et les électrons se situent à une distance de l'ordre de 10^{-10} m ce qui signifie qu'un électron se trouve à une distance du noyau 100 000 fois plus grande



Entre le noyau d'un atome et les électrons il y a le vide

Dans l'infiniment grand on retiendra les **étoiles** (dont le Soleil fait partie), le système solaire comportant, outre le Soleil, huit **planètes** (Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, et Neptune ainsi que les **satellites** de ces planètes, les **astéroïdes** et les **comètes**).

Les étoiles sont regroupées dans des **galaxies**. Il existe un très grand nombre de galaxies. La galaxie dont fait partie le Soleil est la **Voie Lactée** (appelée aussi «**notre Galaxie**», ou «**la Galaxie**»).

2. La structure lacunaire : Propriété commune

Le vide qui règne entre les électrons et le noyau des atomes existe également entre les grandes structures au niveau de l'univers.

C'est une propriété commune aux structures infiniment petites et infiniment grandes. Il s'agit de la **structure lacunaire**. Dans une telle structure, la matière est assez bien localisée dans certaines régions de l'espace et entre ces zones où se concentre la matière il règne le vide où le quasi vide.

Que ce soit à l'échelle de des atomes, des planètes, des étoiles ou des galaxies on retrouve une structure lacunaire où les différents éléments sont séparés par de grandes étendues de vide

3. L'année lumière

a)-L'année lumière : c'est la distance parcourue en un an par la lumière dans le vide en une année. Elle est notée *al* et elle vaut $9,46 \cdot 10^{15}$ m. (on rappelle que la vitesse de la lumière est d'environ 300.000 km/s).

$$1a.l. = 3,0 \times 10^8 \times 365,25 \times 24 \times 3600 = 9,46 \times 10^{15} m$$

b)-L'unité astronomique, notée *UA*, est la distance entre la Terre et le Soleil :

$$1 UA = 150.000.000 km \text{ environ}$$

c)-Le parsec, noté *pc* *le parsec* = 206.265 UA = 3,23 al = 3100 milliards de km

4. La lumière

La lumière (au sens large) ou un rayonnement électromagnétique est le seul moyen de connaissance de l'Univers. Grâce à ses propriétés les astronomes peuvent tirer la position, la couleur, la température, la composition chimique, le magnétisme, et la vitesse des objets qui composent l'univers (étoiles, galaxies,)

A l'heure actuelle, nous disposons d'instruments capables de capter presque tous les rayonnements électromagnétiques..., depuis les ondes radio jusqu'aux rayons gamma. Il se trouve que les astres émettent toutes ces sortes d'ondes, chacun ayant une gamme de fréquences déterminée par sa nature physique, et par l'énergie disponible

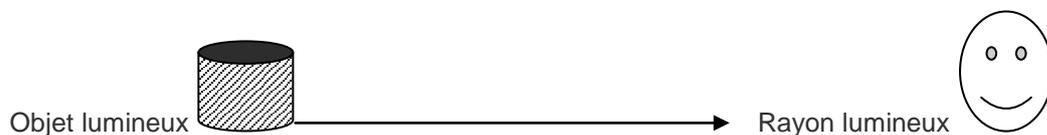
Voir loin c'est voir dans le passé

A la vitesse de $3 \cdot 10^5$ Km /s, la lumière met 1,3 secondes pour aller de la Terre à la Lune, 8 minutes pour aller du Soleil à la Terre, 6 heures pour aller du Soleil à Pluton...

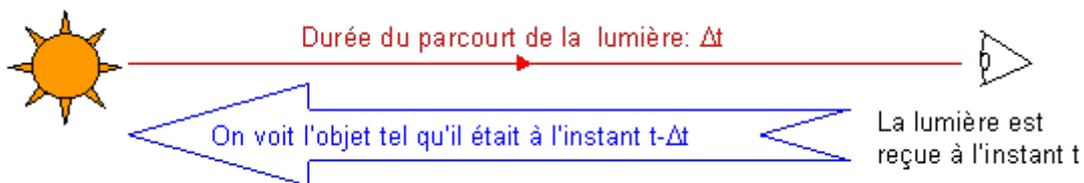
Mais elle met 4,2 années pour nous parvenir de l'étoile la plus proche. Ceci a une conséquence très importante : nous voyons l'étoile la plus proche non telle qu'elle est actuellement, mais telle qu'elle était il y a 4,2 années !

Et plus on voit loin, plus les objets qu'on observe sont vieux. Les objets les plus lointains qu'on puisse voir actuellement sont situés à près d'une dizaine de milliards d'années-lumière, autant dire qu'on les voit maintenant tels qu'ils étaient il y a une dizaine de milliards d'années.

Tout objet qui est visible pour l'œil émet de la lumière. La propagation de cette onde lumineuse n'est pas instantanée. Celle-ci met du temps à parcourir la distance qui sépare l'œil de l'objet observé.



La lumière reçue nous apporte des informations sur un objet tel qu'il était au moment de l'émission de cette lumière.



Plus l'objet est éloigné, plus la durée Δt du parcours de la lumière est grande et plus nous observons dans le passé.

5. La gravitation universelle

C'est l'attraction gravitationnelle qui agit sur nous et nous plaque au sol. On dit que la gravité est universelle, parce que c'est une propriété de la matière : tout objet matériel attire tous les autres.

La pomme de Newton attire la Terre proportionnellement à sa masse qui est très faible. La Terre attire la pomme proportionnellement à sa masse qui est très grande. Le résultat est que la pomme tombe vers la Terre beaucoup plus que ce que la Terre tombe vers la pomme !

Selon le principe d'attraction gravitationnelle : le Soleil attire les planètes vers lui, d'autant plus fortement qu'elles sont plus proches. Par conséquent une planète proche doit tourner plus vite qu'une planète lointaine. (pour ne pas tomber sur le Soleil!) . On peut vérifier cela sur le tableau suivant, qui donne la liste des 9 planètes principales avec leurs caractéristiques orbitales :

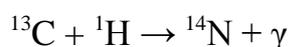
| planète | distance | | vitesse km/s | année | inclinaison équateur | inclinaison orbite | excentricité |
|------------------|----------------|------|-----------------|------------------|-------------------------|-----------------------|--------------|
| | millions de km | UA | | | | | |
| Mercure | 58 | 0,39 | 48 | 88 j | 7° | 7° | 0,21 |
| Vénus | 108 | 0,72 | 35 | 224 j | 3° 4' | 3° 23' | 0,01 |
| Terre | 150 | 1 | 30 | 365 j | 23° 26' | 0° | 0,02 |
| Mars | 228 | 1,52 | 24 | 1 an 321 j | 23° 59' | 1° 51' | 0,09 |
| Jupiter | 778 | 5,19 | 13 | 11 ans 314 j | 3° 5' | 1° 18' | 0,05 |
| Saturne | 1.430 | 9,53 | 9,6 | 29 ans 167 j | 26° 44' | 2° 29' | 0,06 |
| Uranus | 2.876 | 19,2 | 6,8 | 84 ans 7 j | 97° 55' | 0° 46' | 0,05 |
| Neptune | 4.506 | 30 | 5,4 | 164 ans 280 j | 28° 48' | 1° 46' | 0,01 |

5. La fusion nucléaire

Les réactions chimiques portent sur les nuages électroniques, sans jamais toucher aux noyaux ; par contre les réactions nucléaires portent sur les noyaux.

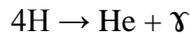
De la même manière une réaction chimique nucléaire consiste à prendre certains composants, et à les remplacer par d'autres.

Les constituants sont des noyaux atomiques (constitués de protons neutrons), et la réaction les réorganise en deux nouveaux noyaux, en conservant le nombre de nucléons. Par exemple, un atome de ^{13}C (carbone 13, 6 protons et 7 neutrons) et un atome d'hydrogène (1 proton) vont donner un atome de ^{14}N (azote 14, 7 protons et 7 neutrons). Ce qui s'écrit :



Dans cette réaction, le γ (gamma) représente un photon qui est émis, et qui emporte de l'énergie. L'énergie qui gouverne une réaction nucléaire est des centaines de millions de fois plus élevée que celle qui gère les réactions chimiques

Les réactions de fusion est un type de réactions nucléaires dans les quelles, on ajoute des composants pour former des noyaux plus lourds en libérant de considérables quantités d'énergie., ces réactions se produisent au niveau des étoiles : Voici un exemple de telles réactions :



L'hydrogène fusionne pour donner de l'hélium (4 noyaux d'hydrogène donnent un noyau d'hélium), mais l'hélium lui-même peut fusionner pour donner des éléments plus lourds encore, carbone (3 noyaux d'hélium donnent un noyau de carbone), oxygène, azote. Toutes les réactions de fusion produisent de l'énergie

Il faut souligner que l'intérieur des étoiles est très énergétique ; il permet la formation d'une grande partie de la matière de puis le carbone jusqu'au fer. Après explosion de l'étoile, le reste de la matière est formé dans le milieu interstellaire à la suite de capture de neutrons (le noyau devient de plus en plus lourd jusqu'à l'Uranium) et à la suite de réactions de spallation (fissure d'atomes pour donner naissance au Béryllium, au Bore et au Lithium).

II-LA HIERARCHIE DE L'UNIVERS (fig. 2)

Une **galaxie** est l'entité de base de l'Univers ; elle est constituée de milliards d'étoiles.

Un **amas** est constitué de milliards de *galaxies*

Un **superamas** est constitué de quelques à plusieurs milliers d'*amas*

Notre *Galaxie*, appelée *la Voie Lactée*, n'est qu'une parmi les milliards de galaxies ; elle est constituée de quelques dix milliards d'étoiles. Le Soleil est l'une de ces d'étoiles.

Le centre des amas est souvent occupé par une galaxie géante que l'on soupçonne d'avoir grandi en avalant celles de ces congénères que la gravité avait conduit vers elle.

III-NOTRE GALAXIE, LA VOIE LACTEE

La Galaxie (en Majuscules) est une sorte de galette aplatie, en rotation (250km/s), qui présente des bras spiraux (**fig.3**). Son diamètre est d'environ 100.000 al et son épaisseur maximale est de l'ordre de 6.000 al. Elle est formée de 10^{19} étoiles.

Le Soleil est l'une de ces étoiles qui forme, avec des planètes qui gravitent autour d'elle, *le système solaire*.

Ce dernier est situé à environ de 30.000 al du centre de la Galaxie; il fait le tour (dans le sens des aiguilles d'une montre vue de dessus) en 240 millions d'années. (240 Ma = 1 unité galactique).

Le centre de la Galaxie se présente sous forme de bulbe stellaire peu aplati où se condense beaucoup de vieilles étoiles. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne de ce centre les étoiles sont jeunes et elles sont très éloignées les unes des autres (3 al).

Au centre de ce bulbe, existe un **trou noir**, constitué de matière très dense.

IV. LES GALAXIES

1. – Les différents types de galaxies

Les photographies réalisées aux télescopes terrestres et spatiaux ont permis de mettre en évidence l'existence d'innombrables galaxies semblables à la Voie Lactée. Toutes ces galaxies se situent à des distances supérieures à 2 millions d'années-lumière.

Selon leur morphologie, les galaxies ont été classées par Edwin Hubble (fig.5) en quatre catégories :

a) - *Les galaxies elliptiques* ont la forme d'ellipsoïdes plus ou moins aplatis, avec une répartition d'étoiles augmentant vers le centre, mais ne montre aucune structure fine. Elles présentent une symétrie de rotation complète. Suivant leur ellipticité, on les qualifie de E0 (les plus sphériques), E1, E2, ..., ou E7 (les plus aplaties).

b) - *Les galaxies spirales* ont une forme aplatie, la plupart des étoiles brillantes étant concentrées dans un disque peu épais, et suivant des bras que dessinent des spirales à partir de la région centrale. Au niveau du bulbe des galaxies spirales se trouve une grande concentration d'étoiles.

Les galaxies spirales se divisent elles-mêmes en deux branches :

*- les spirales normales (S), dans lesquelles les bras partent directement du bulbe,

*- les spirales barrées (SB), dont les bras se détachent à l'extrémité d'une « barre » traversant le bulbe.

Les galaxies spirales, normales ou barrées, se différencient entre elles par l'importance relative de leur bulbe et de leurs bras et par l'ouverture de ces bras. On distingue :

** - les Sa et SBa, au bulbe important et dont les bras s'enroulent de façon serrée autour du bulbe,

** - les Sc et SBc, au bulbe ténu et aux bras très ouverts,

** - les Sb et SBb, aux propriétés intermédiaires.

c) - *Les galaxies lenticulaires* (S0), a été introduite pour désigner certaines galaxies elliptiques très aplaties possédant un bulbe très lumineux

d) - *Les galaxies irrégulières*, on ne peut mettre en évidence aucun axe de symétrie et elles sont riches en matière interstellaire et en étoiles jeunes.

En nombre, les 2/3 des galaxies de l'Univers ont une forme spirale, 10% sont elliptiques et 25% lenticulaires. Parmi les galaxies spirales, les 2/3 d'entre elles sont barrées.

Notons enfin que la plupart des galaxies présentent un trou noir au centre du bulbe qui serait constitué de la matière car il émet des ondes radios

- **2. Les galaxies proches : Groupe local et du Superamas local**

Le **groupe local** (ou amas local) est un petit amas d'une vingtaine de galaxies groupées sur 1 Mpc auquel appartient la Galaxie (fig.6). Sa taille est d'environ un million al, dix fois le diamètre de la Voie Lactée.

Il comprend :

- deux galaxies satellites, le Grand et le Petit Nuage de Magellan,

- deux autres grandes galaxies spirales : Andromède (type Sb), avec ses deux satellites M 32 et NGC205, et la galaxie du Triangle (de type Sc).

- quelques galaxies irrégulières

- des galaxies de petites dimensions, peu riches en étoiles (quelques dizaines de millions) et dépourvues de gaz et de poussière interstellaires.

Toutes ces galaxies se déplacent autour d'un centre commun situé entre notre Galaxie et la Nébuleuse d'Andromède.

Le **superamas local**

Le groupe local fait partie d'un énorme complexe de 10000 galaxies assemblées dans des amas s'étendant sur quelques 200 millions d'années lumières, appelé Superamas local ou Superamas de la Vierge (fig.8).

Le Superamas de la Vierge et la Superamas de l'Hydre et du centaure semblent, eux-mêmes, converger vers une autre grande agglomération d'amas (superamas) que l'on appelle le *Grand Attracteur*.

V-LES ETOILES : NAISSANCE ET EVOLUTION

Une étoile est un objet céleste en rotation, de forme approximativement sphérique, car la rotation entraîne un aplatissement aux pôles, et dont la structure est modelée par la gravité.

La formation d'une étoile commence par un nuage moléculaire géant (Nébuleuse). Il est composé de poussière et de gaz, lorsque la pression interne devient insuffisante pour contrebalancer les forces d'autogravitation (quand l'équilibre est rompu), il se produit un effondrement (gravitationnel) c'est dire la contraction d'un corps massif sous l'effet de sa propre attraction gravitationnelle. Cela s'accompagne d'une augmentation de température qui donnera naissance au phénomène de fusion nucléaire.

Lorsque la température atteint quelques Millions de K^0 le cœur «s'allume» : l'hydrogène fusionne en hélium (réactions de fusion nucléaire) fournissant l'énergie qui contre l'effondrement. L'énergie produite est progressivement évacuée par l'étoile sous forme de rayonnement (lumière visible) ; de vents stellaires et de neutrinos.

La matière qui la compose s'en trouve presque complètement ionisée du fait de la température élevée qui règne en son centre.

- L'évolution ultérieure d'une étoile dépend essentiellement de sa masse :

- Si sa masse est faible, elle évoluera en *géante rouge* semblable au soleil. La plupart des étoiles visibles sont dans le même stade d'évolution que le Soleil, c'est-à-dire qu'elles rayonnent l'énergie libérée par la combustion de l'hydrogène en hélium dans leur région centrale. Cette dernière subit une contraction; elle est beaucoup plus dense et plus chaude (10^8 K). Par contre l'enveloppe se dilate et refroidit. La phase géante rouge des étoiles a une durée d'environ 10 % la phase précédente. La matière finit par se condenser dans la partie centrale grâce à des fusions nucléaires et la géante rouge évolue en *naine blanche*.

Le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre, l'énergie qu'il rayonne y permet le développement de la vie. Il apparaît bien plus lumineux que toutes les autres étoiles en raison de sa proximité.

- Si la masse est plus grande, l'étoile continue son évolution en passant par la phase géante rouge qu'elle traverse évidemment plus rapidement pour évoluer en une *supergéante*. Dans ce cas l'étoile est en mesure d'amorcer des réactions de fusion avec des éléments chimiques de plus en plus lourds. Elle peut ainsi synthétiser du carbone, puis de l'oxygène, du néon, etc. (on parle de nucléosynthèse stellaire) dans les derniers stades de leur évolution.

Si une étoile est suffisamment massive pour synthétiser du fer, elle subit une importante explosion qui disperse la plus grande partie de sa masse dans le milieu interstellaire. (*Supernova*).

Le résidu laissé par l'implosion du cœur est un objet extrêmement compact, qui peut être soit une étoile à neutrons, (en rotation rapide qui émettent des ondes radio de façon très régulière appelées *pulsars*), soit un trou noir.

VI-AGE DE L'UNIVERS

L'âge de l'Univers a été estimé à 15 ± 5 milliards d'années. Il a été obtenu par trois méthodes indépendantes les unes des autres : le mouvement des galaxies, l'âge des plus vieilles étoiles (en examinant leurs spectres) et l'âge des plus vieux atomes (radiochronologie qui sera examinée en chapitre 7).

<http://www.web-sciences.com/documents/seconde/sedo07/seco07.php5>

<http://astronomia.fr/>

<https://www.iter.org/fr/sci/whatisfusion>

<http://fr.wikipedia.org/>

Eléments de cours de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 3

LE SYSTEME SOLAIRE

I- DEFINITIONS ET ORGANISATION

Notre système solaire comprend le *Soleil* qui est une étoile moyenne, autour duquel gravitent les planètes *Mercury, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune*, et *Pluton (Planète naine)*, les 60 *satellites* des planètes; un certain nombre de *comètes*, d'*astéroïdes* (formant une ceinture entre Mars et Jupiter) et le *milieu interplanétaire* (fig.1).

*-Définitions simples :

Une planète : c'est un corps céleste en orbite autour du soleil, de forme sphérique et qui a pu éliminer les autres corps autour de lui lors de sa formation

Une planète naine : c'est un corps céleste, de petite taille, en orbite autour du soleil, de forme sphérique et qui n'a pas pu se débarrasser des autres corps autour de lui lors de sa formation (Pluton, Cérès)

Le système solaire contient :

a)-Une étoile : le Soleil.

b)-Quatre planètes internes ou telluriques dites aussi rocheuses qui, durant leur évolution, ont perdu l'hydrogène et l'hélium, mais conservent une atmosphère importante (sauf Mercury). Il s'agit de planètes les plus proches du soleil, Mercury, Vénus, la Terre et Mars,

c)-Des planètes externes ou gazeuses dites aussi géantes gazeuses, formées de noyaux solides (de roche ou de glace) entourés essentiellement de gaz d'hydrogène et de l'hélium. Ce sont les planètes les plus éloignées du Soleil, avec successivement Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton (qui est une planète naine),

d)-Les Satellites planétaires qui gravitent autour des planètes. On connaît au moins 60 satellites dans le système solaire. Leurs diamètres varient de 5300 km à 30 km. Ils sont constitués en général d'un mélange de roches et de glaces.

Il y a deux planètes qui n'ont pas de satellites, Mercury et Vénus, tandis que les planètes Jupiter, Saturne et Uranus en possèdent plus qu'une dizaine chacune. L'unique satellite de la Terre est la Lune. Sauf cette dernière et quelques satellites de la planète Jupiter, les densités des satellites sont en général inférieures à 2. La plupart des satellites montrent d'abondants cratères d'impacts. Seule la lune Io de la planète Jupiter possède des volcans actifs comme on en observe sur la Terre.

e)-Les Astéroïdes sont des corps rocheux et de glace de quelques km à 1000 km de diamètre. Ils se localisent entre les orbites des planètes Mars et Jupiter dans une région que l'on appelle *ceinture d'astéroïdes*, et au delà de l'orbite de Neptune dans une ceinture appelée *ceinture de Kuiper (corps glacés)*. Il existe plus de 4000 astéroïdes numérotés, mais leur masse totale n'est que 5% de celle de la terre

f)-Les comètes sont des astres constitués de glaces et de poussières, de forme irrégulière, tout comme les astéroïdes. Leur taille est comprise entre 1 et 40 km. Elles ont des orbites non-elliptiques autour du Soleil, en dehors de l'écliptique. Leur masse dépasse de 50 fois celle de la Terre. A cause du chauffage par la radiation solaire, la comète émet des quantités

importantes de gaz et produit une queue spectaculaire. Leur origine serait la ceinture de Kuiper et/ou le nuage d'Oort. Leur révolution autour du soleil peut durer 76 ans (comète de Halley) jusqu'à 2.400 ans (comète de Hall - Bopp).

g)-Les Météorites représentent des fragments de débris provenant des astéroïdes ou de comètes qui entrent dans l'atmosphère de la Terre et qui tombent sur la surface terrestre. On pense qu'une immense météorite (plusieurs km de diamètre) a été la responsable de la disparition des dinosaures, il ya 65 millions d'années.

h)-Le milieu interplanétaire : il inclut au moins 2 constituants :

- La poussière interplanétaire qui correspond à des particules solides microscopiques,
- Le gaz interplanétaire, que l'on appelle aussi *plasma*, qui correspond à un courant de gaz chaud avec des particules chargées, pour la plupart, de protons et d'électrons. Ce courant provient du Soleil et il est appelé le *vent solaire*.

II- CARACTERISTIQUES DES PLANETES

Les planètes, la plupart de leurs satellites et les astéroïdes tournent autour du Soleil sur des orbites circulaires dans le sens anti-horaire (si regarde le nord du Soleil à partir du haut) sauf pour Venus.

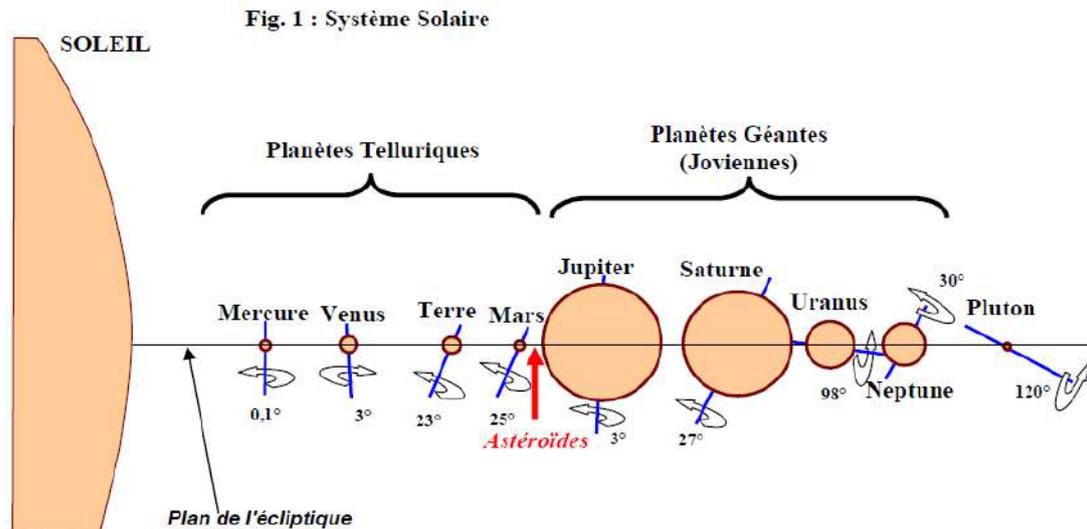
La gravitation des planètes se fait selon un plan dit *écliptique* (fig.3). Pluton, la plus elliptique de toutes les planètes, est un cas particulier car son orbite est le plus inclinée (17° 15') (fig.1).

L'axe de rotation, pour la plupart des planètes, est presque perpendiculaire à l'écliptique. Il y a cependant deux exceptions : Uranus et Pluton, qui sont inclinées sur leurs côtés. La répartition de la masse à l'intérieur du système solaire se présente de la façon suivante :

Soleil : 99,85%; Planètes : 0,13%; Comètes, Satellites, Astéroïdes, Milieu Interplanétaire : 0,02%.

Les caractéristiques de quelques planètes du système solaire

| | Vénus | Terre | Mars | Jupiter | Saturne |
|---|--------------------------------|---|---------------------|-----------------------------------|---------|
| Distance au soleil (unité astronomique) | 0,7 | 1 | 1,5 | 5,2 | 9,5 |
| Rayon à l'équateur (km) | 6052 | 6378 | 3397 | 71998 | 60000 |
| Densité moyenne | 5,25 | 5,52 | 3,94 | 1,31 | 0,69 |
| Pression atmosphérique au sol (mbars) | 90 000 | 1 000 | 7,4 | | |
| Température au sol (degrés Celsius) | + 460 | +50 -70 | 0 -70 | | |
| Constitution de l'atmosphère | CO2 : 96 % N2, Vapeur d'eau | Azote : 79 % O2 : 20 % Argon, CO2 | CO2 : 95 % Azote | H2 : 90 % He : 10 % Méthane | |



III- L'ATMOSPHERE DES PLANETES TELLURIQUES : Venus- Mars et la Terre

L'atmosphère des planètes telluriques est le fluide gazeux qui entoure leur surface. Ce gaz est maintenu par l'attraction gravitationnelle et est entraîné avec la planète.

Une planète ne peut capturer une atmosphère que si elle possède une masse suffisante, c'est le cas de Venus, de la Terre et de Mars et des planètes gazeuses

Au moment de la formation des planètes, une atmosphère s'est formée par le dégazage des gaz piégés (contenus ou emprisonnés) dans les roches - due à l'activité volcanique - ainsi que par des impacts de (astéroïdes, comètes) contenant des gaz volatils tels que H_2O et CO_2 , ces météorites se sont abattus sur les planètes durant leur jeunesse (leur formation).

L'Atmosphère des planètes étaient composées principalement de H_2O , CO_2 , N_2 , et la composition de l'atmosphère pour chaque planète va dépendre et évoluer principalement en fonction de sa masse, de sa taille et de sa température, donc de sa distance au Soleil

➤ **Mercur**

Mercur n'a probablement pas eu une atmosphère primitive comme les autres planètes telluriques à cause de sa proximité avec le soleil et à cause de sa faible masse d'où une faible gravité (c'est aussi le cas de la Lune, de Pluton, et de tous les satellites du système solaire, à l'exception notable de Titan.),

➤ **Vénus**

Vénus a probablement possédé autant d'eau que sur la Terre. Avec une température probablement inférieure à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (le soleil jeune était moins intense), l'eau se trouvait sous forme liquide formant des océans. Cependant, Vénus étant plus proche du soleil, sa température était nécessairement plus chaude que celle de la Terre, permettant progressivement une évaporation plus importante des océans.

Une grande quantité de vapeur d'eau augmente l'efficacité de l'effet de serre et par conséquent la température, qui à son tour fait croître à nouveau l'évaporation. L'eau se retrouve à l'état gazeux sous forme de vapeur d'eau et il n'y a plus de pluie qui permet de soustraire (diminuer ou dissoudre) le gaz carbonique, ce qui entraîne une augmentation inévitable de la quantité de CO_2 par le volcanisme (qui atteint 95%) et par conséquent de la température de l'atmosphère qui devient la plus dense avec une pression atteint 90 bars, 90 fois celle de la Terre et la température $450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

➤ **La Terre**

La Terre, grâce à une orbite plus éloignée du Soleil, a connu une évolution très différente de

Vénus.

A l'origine, l'atmosphère terrestre était probablement très semblable, constituée principalement de vapeur d'eau. Comme sur Vénus, le refroidissement de la planète après sa formation conduisit à la naissance d'océans. Mais, grâce à une distance supérieure au Soleil, donc une température moindre, ces océans n'étaient pas menacés d'évaporation, (mais plutôt ils étaient en danger de se solidifier en glace). Le CO₂ gaz à effet de serre a permis à la Terre de conserver une température suffisante pour que les océans demeurent sous forme liquide.

Avec le temps, la puissance du Soleil augmenta jusqu'au niveau actuel et assura une température modérée à notre planète. Parallèlement, la plus grande partie du dioxyde de carbone fut petit à petit emportée par les pluies, dissoute dans les océans et capturée dans les roches sédimentaires des fonds océaniques.

L'atmosphère terrestre ne contient que 0,04% de CO₂ et la T°moyenne est de 15°C ; elle a été affectée par l'apparition de la vie, en particulier la mise en place de la photosynthèse. Le processus par lequel certaines cellules transforment le rayonnement solaire en énergie chimique en consommant du dioxyde de carbone et en émettant de l'oxygène, O₂ (21 %) et 78 % d'Azote N₂.

Grâce à ce processus, un nouveau type d'organisme put apparaître, qui s'appuyait cette fois sur la respiration, le processus grâce auquel les animaux produisent de l'énergie en consommant de l'oxygène et en rejetant du dioxyde de carbone.

➤ **Mars**

Dans la théorie la plus répandue, l'atmosphère martienne serait née dans des conditions similaires, avec le dégazage de grandes quantités de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone.

Grâce à l'effet de serre engendré par ces gaz, la température aurait été suffisante, et la pression atmosphérique suffisamment forte pour que l'eau puisse exister sous forme liquide pendant une très longue période. (300 millions d'années)

Les traces de lits de rivières à la surface de Mars sur des terrains géologiques anciens et des roches argiles très anciennes, prouvent que l'eau a coulé à la surface de Mars pendant les premiers 500 millions d'années

Mais lorsque le champ magnétique Martien aurait cessé de fonctionner, les vents solaires auraient progressivement arraché à Mars son Atmosphère, et la pression aurait diminué jusqu'au point où il n'est plus capable de maintenir l'eau liquide. Ce qui transforme le sol martien en un véritable désert.

Une dernière période se poursuit, l'atmosphère martienne, devenue très ténue et pauvre en vapeur d'eau, aurait lentement oxydé un sol martien riche en fer, donnant à la planète sa couleur rouge.

La diminution de la quantité de gaz à effet de serre jusqu'aux pressions actuelles de 7 mbar, a refroidit ainsi l'atmosphère jusqu'aux températures actuelles (-50 °C).

IV- LE SOLEIL

Le Soleil est une sphère de rayon d'environ 696.000 km. Sa température de surface est de 5.800°K; elle augmente jusqu'à 15.000.000 °K au centre. Il accomplit une rotation complète en 25 jours à l'équateur et 36 jours aux pôles. Ce phénomène, appelé "rotation différentielle" est dû au fait que le Soleil n'est pas un corps solide comme la Terre. Par contre, le noyau du Soleil tourne comme un corps solide.

Le Soleil est actuellement constitué de 75% d'hydrogène et 25% d'hélium en masse. Le reste ("métaux") compte pour environ 0.1%. Cette composition change lentement alors que le Soleil transforme l'hydrogène en hélium à l'intérieur de son noyau.

Le Soleil émet des ondes radio, des rayons X, des particules énergétiques, une quantité

importante de neutrinos, en plus de la lumière visible. La production d'énergie du Soleil (386 milliards de milliards de mégawatts) est produite par la fusion nucléaire

V- DONNEES GENERALES SUR LA TERRE

*-La Terre parcourt, dans le sens direct (sens inverse des aiguilles d'une montre), une orbite quasi elliptique et plane autour du Soleil (plan de l'écliptique).

*-La Terre tourne sur elle-même, autour de l'axe des pôles, dans le sens direct (d'ouest en est). L'axe de rotation de la Terre est incliné par rapport au plan de l'écliptique). Cette inclinaison, de 23° 26', est à l'origine des variations de la durée des jours et des nuits ainsi que des saisons.

*-Le plan normal à l'axe de rotation terrestre coupant en deux hémisphères la sphère terrestre s'appelle plan équatorial terrestre. L'intersection de ce plan avec la Terre est l'équateur terrestre.

*-La gravitation correspond à une attraction matérialisée par le phénomène de la chute d'un corps ou de la rotation d'un astre autour d'un autre. La Terre, comme tout objet ayant une masse, exerce une force d'attraction sur les autres objets comme la Lune par exemple, qui est l'astre le plus proche de notre planète. On dit que la Terre possède un champ gravitationnel où cette force d'attraction s'exerce en tout point autour de la Terre.

*-La pesanteur est le champ d'attraction de la Terre liée à la gravitation universelle. Celle-ci se traduit par une équation qui permet de calculer la force gravitationnelle (F_g) avec laquelle deux corps s'attirent l'un vers l'autre.

| | |
|---|--|
| $F_g = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{r^2}$ | F_g = Force d'attraction entre les corps en newtons (N) G = Constante de la gravitation universelle $\approx 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ m_1 = Masse du premier objet en kilogrammes (kg) m_2 = Masse du deuxième objet en kilogrammes (kg) r = Distance séparant les deux objets en mètres (m) |
|---|--|

La force de pesanteur englobe à la fois la *gravité* (force d'attraction) et la *force centrifuge* (force d'échappement), qui provient du mouvement de rotation de la planète.

---Si un corps céleste est très massif, il retient intégralement dans son atmosphère les gaz les plus légers (comme le dihydrogène (H_2) et l'hélium (He)) qui, en grande quantité, sont incompatibles avec la vie. C'est le cas des planètes géantes gazeuses (formées presque entièrement d'hydrogène et hélium).

---Si un corps céleste est très petit, il laisse échapper tous les gaz, ainsi que la vapeur d'eau. Un tel corps est dépourvu d'atmosphère (Mercure, Lune...).

*-La Terre est suffisamment grosse pour retenir les gaz indispensables à la vie (comme le CO_2) et suffisamment petite pour avoir laissé échapper les gaz les plus légers (H_2 et He), incompatibles avec la vie.

*-La densité moyenne du globe est de 5,5 ; celle des roches de surface est environ 2,7 celle des roches volcaniques est de l'ordre de 3, quand au zones internes la densité est encore plus élevée.

*-La Terre possède un *champ magnétique*, aussi appelé bouclier terrestre, c'est un immense champ magnétique qui entoure la Terre, il est engendré par les mouvements du noyau métallique liquide des couches profondes de la Terre. Le champ magnétique terrestre joue un rôle essentiel dans le développement de la vie sur Terre, en protégeant l'atmosphère terrestre et en déviant les particules mortelles du vent solaire.

VI- FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE

Plusieurs hypothèses ont été avancées quant à l'origine du système solaire. Les interprétations récentes, convergent à l'idée que le Soleil et les planètes proviennent d'un même nuage composé de gaz et de poussières formés de reste d'une supernova issue de l'explosion

d'étoiles plus anciennes:

1. Il y a environ 5 milliards d'années ce nuage étant en rotation, ces particules sont mises à tourner et à s'attirer les unes les autres, s'effondre sous sa propre gravité, puis il s'est aplati pour former un disque.

2 - Le centre de ce disque se comprime et lorsque sa masse fut suffisamment dense et chaude, les réactions nucléaires se sont enclenchées. Ainsi on a naissance d'une *protoétoile* autour de laquelle gravite le reste du gaz et les poussières (10% de la masse initiale) ce qui a donné naissance à une étoile, notre Soleil. A ce sujet, il faut distinguer deux sortes de nébuleuses:

- les nébuleuses initiales gazeuses constituées essentiellement d'hydrogène et d'hélium qui sont à l'origine des étoiles (étoiles de première génération) dès les premiers instants de la naissance de l'univers ;
- les nébuleuses planétaires qui ont pris naissance suite à l'explosion des étoiles formées de débris et de gaz. Lors de la formations du disque planétaire l'hydrogène et l'hélium se concentrent au centre de cet édifice pour donner naissance à une proto-étoile qui évoluera en une étoile (étoiles de deuxième génération) ;

3 - Pendant ce temps, au niveau du *disque protoplanétaire* en gravitation et relativement froid, la poussière s'agglomèrent (*accrétion*) pour former des corps solides : des astéroïdes puis des *planétoïdes* attirant vers eux de plus en plus de matière ; tandis que la chaleur est alors si importante que ces corps entrent en fusion : le corps ainsi formé est appelé une *protoplanète*. Tous ces fragments se sont collés les uns les autres et ont formé les planètes.

5- A environ un million d'années les noyaux des planètes géantes se sont formés. Puis ils ont attiré le gaz qui restant dans la nébuleuse. Si les planètes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) ont une taille décroissante par rapport à leur distance du Soleil, c'est que le disque de la nébuleuse est de moins en moins dense à mesure que l'on s'éloigne du Soleil, donc Saturne dispose de moins de gaz que Jupiter, Uranus moins que Saturne, et Neptune moins qu'Uranus.

Pendant au moins un milliard d'années, ces corps ont été soumis à un bombardement très violent de météorites, restes de la nébuleuse, ce qui a formé la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter et celle de Kuiper et au-delà de Neptune

<http://system.solaire.free.fr/>

<http://keepschool.com/>

<http://www.astronomes.com>

<http://villemin.gerard.free.fr/Astronom/TerAttra.htm>

<http://villemin.gerard.free.fr/Scienmod/Gravitat.htm>

Eléments de cours de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 5

STRUCTURE DU GLOBE TERRESTRE

INTRODUCTION

L'étude des forages mais elle est insuffisante car le forage le plus profond ne dépassent pas 12 km, alors que le rayon de la Terre = 6370 km. L'intérieur du globe ne peut donc être connue que de manière indirecte,

La connaissance de la structure profonde de la Terre a été révélée - surtout d'une manière indirecte - grâce à l'apport de plusieurs disciplines des sciences de la Terre parmi lesquelles on cite :

- La sismologie = étude des séismes naturels et artificiels,
- La gravimétrie = étude des variations de g, accélération de la pesanteur,
- La volcanologie = étude des volcans et des activités volcaniques,
- Le géomagnétisme = étude du champ magnétique terrestre,
- La géothermie = étude des répartitions des températures à l'intérieur de la Terre, et des phénomènes physiques et géologiques qui leur sont liés,
- La géochimie = étude de la composition et des propriétés chimiques des roches,
- La minéralogie = étude de la composition et des propriétés minéralogiques des roches,
- Les études de laboratoire en créant les conditions thermodynamiques régnant à l'intérieur de la Terre = étude des géomatériaux,
- Les études des météorites et des astéroïdes qui se sont formés en même temps que la Terre.

Ne pouvant pas traiter, dans le détail, de l'apport de chacune de ces disciplines nous nous limiterons ici à évoquer brièvement le principe de ces méthodes en donnant leurs principaux résultats.

I – MODELE SISMOLOGIQUE DE LA TERRE

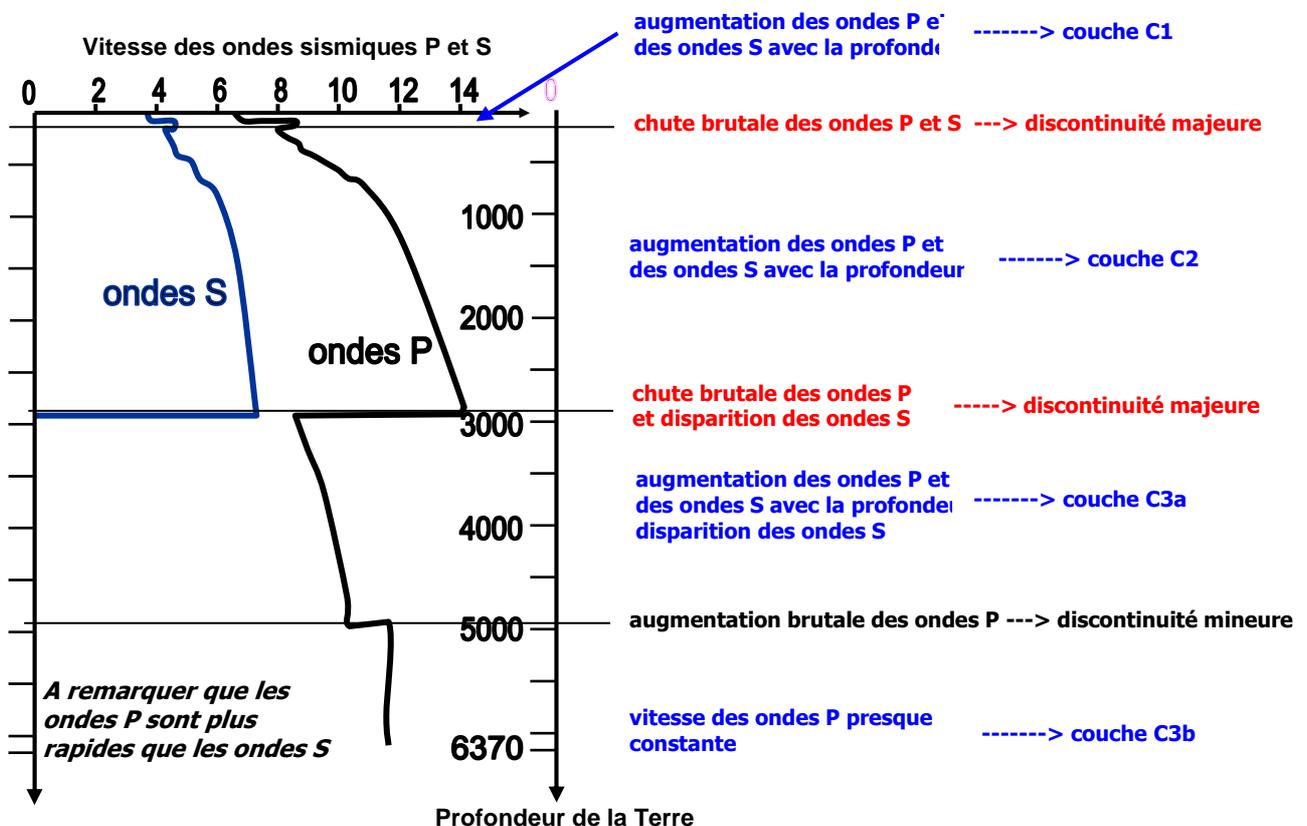
1) – Données sismologiques

Lors de séismes naturels (fracture des roches) ou de fortes explosions (nucléaire par exemple) il y a émission d'ondes sismiques parmi lesquelles :

- les ondes P qui traversent tous les milieux
- les ondes S qui traversent les milieux solides et qui ne passent pas dans les liquides.

Après chaque séisme, les résultats obtenues concernant les vitesses des ondes P et S en fonction de la profondeur du globe terrestre sont toujours les mêmes. On les exprime sous forme de graphe = courbes des vitesses des ondes sismiques en fonction de la profondeur (fig.1).

Fig.1 : Courbes des vitesses des ondes sismiques



L'augmentation brutale des vitesses V_p et V_s à certaines profondeurs, (ainsi que leurs chutes à certains niveaux) veut dire que les ondes P et les ondes S sont passées d'un milieu à un autre de caractéristiques physiques très différentes et qu'elles ont traversé des limites = *surfaces de discontinuité* à l'intérieur de la Terre

Ainsi plusieurs surfaces de discontinuité ont été mises en évidence et qui délimitent, à l'intérieur de la Terre, de grandes couches plus ou moins concentriques (zones de croissance des vitesses) dont la nature physique a été affinée par le calcul grâce aux études de laboratoire.

En effet ces études ont montré que les vitesses V_p et V_s respectives des ondes sismiques P et S augmentent brutalement en fonction de la profondeur de la Terre, qu'elles dépendent de trois paramètres du milieu de propagation liés par les relations suivantes:

$$V_p = \sqrt{\frac{4\mu/3 + k}{d}} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{d}}$$

- μ , coefficient de rigidité, lequel mesure la résistance des roches au changement de forme (pour les fluides $\mu = 0$, d'où $V_s = 0 \rightarrow S$ non transmises) ;
- k , coefficient d'incompressibilité, lequel mesure la résistance des roches au changement de volume;
- d , sa densité (ou ρ sa masse volumique) .

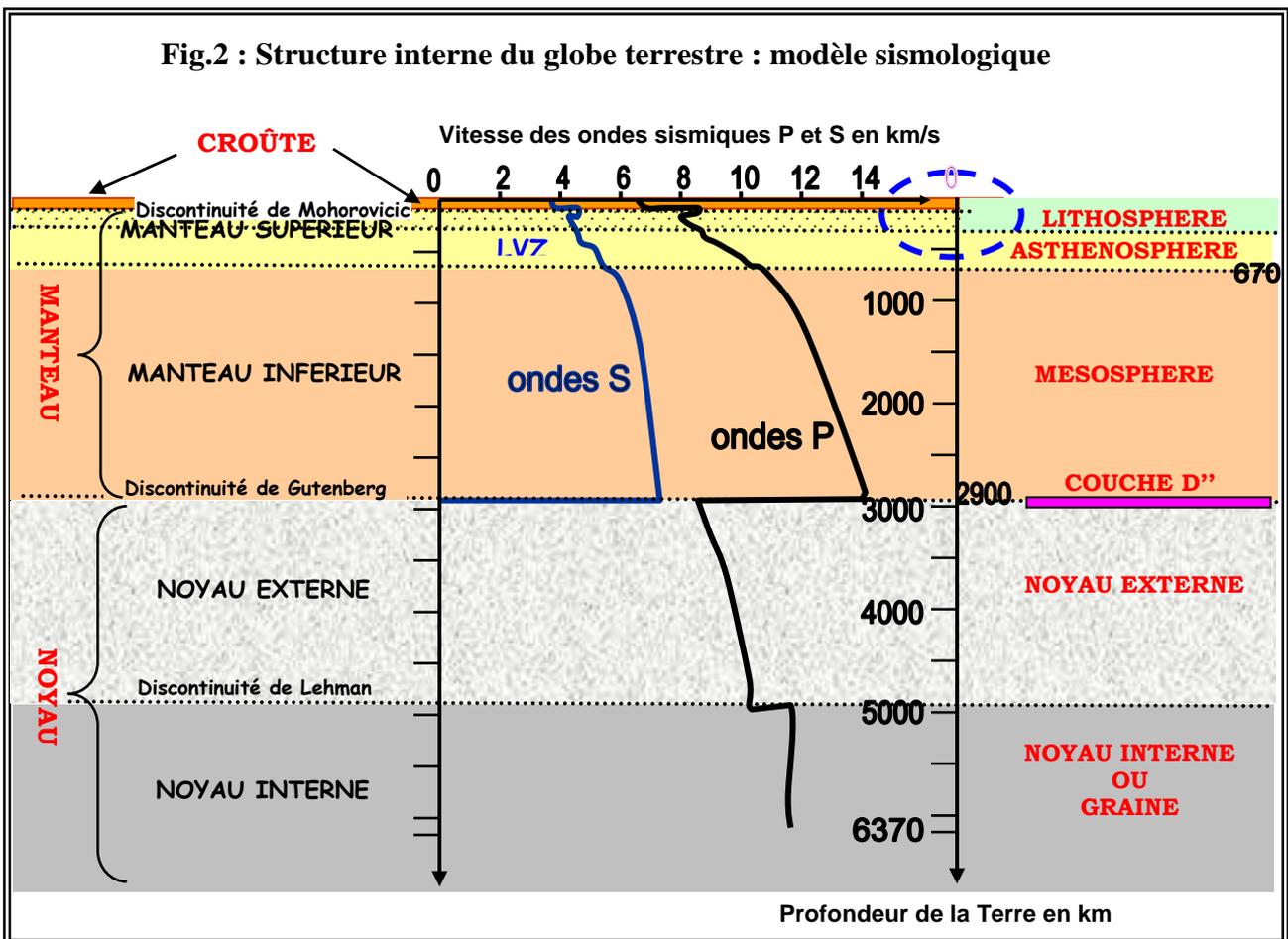
Signalons qu'en réalité, comme la pression augmente avec la profondeur et que les matériaux sont compressibles, *la densité d doit augmenter avec la profondeur* . Cela implique que

plus la vitesse augmente, plus la densité d est croissante et plus les milieux traversés par les ondes P deviennent plus vite de plus en plus rigides et incompressibles (car μ , k plus vite que d)

Le calcul de μ , k et d a permis de trouver la combinaison qui correspond le mieux à la vitesse observée lors d'un séisme à différentes profondeurs, Ce calcul fait intervenir également la sismologie expérimentale sur plusieurs matériaux connus dans lesquels la vitesse de propagation des ondes P et S ont été déterminées.

2) – Structure interne du globe

A partir des résultats de ces travaux, nous nous bornerons à esquisser les grandes lignes de la structure du globe terrestre sous la forme d'un schéma de la figure 2 ci-après montrant deux catégories de subdivisions parallèlement utilisées pour l'intérieur du globe.



a) - Sur la base des discontinuités majeures des vitesses des ondes sismiques

Sur la base des discontinuités majeures mises en évidence par la variation brusque de la vitesse des ondes sismiques du globe terrestre permet de distinguer de l'extérieur vers l'intérieur (fig.2) :

La croûte : c'est la couche externe qui représente 1,5% volume de la Terre. Elle est limitée à la base par la discontinuité majeure de Mohorovicic (dite Moho). Il faut distinguer 2 types de croûte :

- la croûte continentale, épaisse en moyenne de 35 km (mais dont l'épaisseur peut atteindre 70 km sous les hautes chaînes de montagnes).
- la croûte océanique, très mince (5 à 8km sous les océans).

Les différences d'épaisseur de la croûte sont étroitement liées aux phénomènes d'isostasie qui impliquent les différences de la densité des roches (voir TD) .

Le manteau : il représente 82,5 % en volume de la Terre. Son épaisseur est de 2900 km. Il est limité à la base par la *discontinuité majeure de Gutenberg*. On peut distinguer au sein de ce manteau 2 unités :

- le manteau supérieur qui s'étend jusqu'à 670 km.
- le manteau inférieur dont la profondeur est comprise entre 670 km et 2900 km.

Le Noyau : il représente 16% du globe terrestre. Le noyau a une épaisseur maximale de 3300 km. Il comprend :

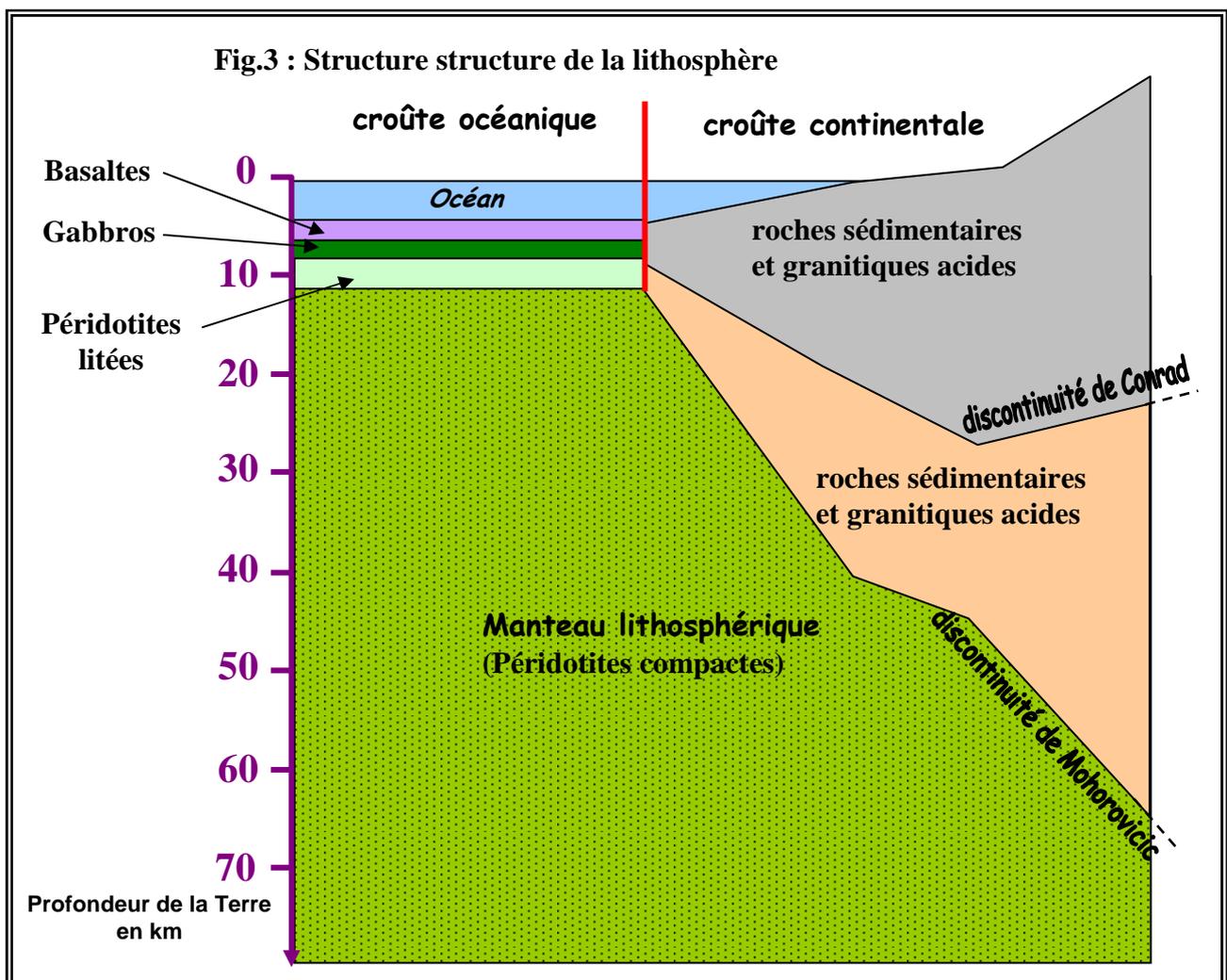
- le noyau externe, dont la profondeur est comprise entre 2900 km et 5150 km.
- le noyau interne (ou Graine). dont la profondeur est comprise entre 5150 km et 6370 km.

b) - Sur la base du comportement physique des couches

Lorsqu'on tient compte du comportement physique des matériaux, selon qu'ils se comportent comme des matériaux rigides ou comme des matériaux «mous», on distingue :

La lithosphère qui est bloc rigide et qui comprend la croûte et la partie sommitale rigide du manteau supérieur. Son épaisseur varie entre 5 km sous les océans et 100 km au niveau des continents (fig.3). Sa limite inférieure est marquée par une discontinuité des ondes sismique dite LVZ (Low Velocity Zone). La densité de la lithosphère se répartit de la façon suivante :

- $d = 2,7 \text{ g/cm}^3$ pour la partie supérieure de la croûte continentale,
- $d = 3 \text{ g/cm}^3$ pour la partie inférieure de la croûte continentale,
- $d = 3,2 \text{ g/cm}^3$ pour la croûte océanique,
- $d = 3,4 \text{ g/cm}^3$ au niveau du manteau supérieur rigide



L'asthénosphère qui est une zone «molle» ou «plastique» qui s'étend depuis la limite inférieure de la lithosphère jusqu'à 670 km de profondeur. Elle est formée du reste du manteau supérieur dont la partie supérieure est une zone de moindre vitesse des ondes sismiques (LVZ) située entre 70 et 200 km de profondeur. Sa densité est d'environ $3,3\text{g/cm}^3$.

La mésosphère est un bloc «rigide»; il est synonyme du manteau inférieur. Sa limite supérieure (670 km) est marquée par la croissance brutale des vitesses des ondes sismiques jusqu'à la discontinuité de Gutenberg (2900 km). Sa densité est également croissante avec cette profondeur en passant de la valeur $3,3$ à $5,5\text{g/cm}^3$

La couche D'' a été mise en évidence grâce à l'étude détaillée des transmissions des ondes P lors d'un fort séisme. C'est une zone molle, de 200 à 300 km d'épaisseur comprise entre le manteau inférieur et le noyau externe. Son rôle est pour l'instant énigmatique.

Le noyau externe est une couche liquide comprise entre la couche D'' et la *discontinuité de Lehman*. Sa densité est croissante avec la profondeur; elle passe de $9,5\text{g/cm}^3$ jusqu'à $11,5\text{g/cm}^3$.

Le noyau interne est une couche solide appelée graine. Sa densité d est égal à 12g/cm^3 .

II - MODELE GEOCHIMIQUE, MINERALOGIQUE DE LA TERRE

1 - Principe des méthodes d'étude

La composition chimique et minéralogique des matériaux à l'intérieur de la Terre est bien connue pour les premiers 250 km de profondeur de la Terre grâce à l'étude directe :

- des péridotites qui sont des roches autrefois profondes, mais maintenant visibles à la surface à la suite de leur soulèvement (par le mécanisme d'obduction) et de l'érosion des terrains qui les cachaient (TD);
- des basaltes et de ses enclaves de péridotites dont le magma est située dans le manteau à différentes profondeurs (TD).

Au-delà de 250 km la composition chimique et minéralogique est actuellement connue indirectement par l'étude

- des matériaux en comprimant par exemple les péridotites entre deux cellules de diamant avec des pressions et des températures équivalentes à celles des différentes zones du manteau (fig.7).
- des vitesses de transmission des ondes sismiques dans différents matériaux en comparant les résultats avec les vitesses obtenues lors d'un séisme (TD).
- L'étude des météorites différenciées ainsi que la sismologie expérimentale ont permis de donner une idée sur la composition chimique du noyau (TD).

2 - Résultats

La croûte

Les constituants principaux de la croûte sont la silice SiO_2 (50 à 60% en moyenne) et d'Alumine (Al_2O_3) (15 à 16% en moyenne). Pour cela on désigne la croûte sous le nom de SIAL. Parmi les autres constituants - qu'on a déterminé sous forme d'oxydes - lesquels sont en beaucoup plus faible pourcentage; on peut citer principalement CaO , MgO , FeO . Ces trois derniers sont plus abondants dans la *croûte océanique* et dans la partie inférieure de la *croûte continentale* que dans la croûte continentale supérieure (fig.4)

Parce que la proportion de silice y dépasse un certain pourcentage la croûte continentale supérieure est dite "acide". Et elle constituée principalement de Quartz + Feldspaths + Pyroxènes.

Parce que la proportion de silice y est inférieure à un certain pourcentage de croûte continentale inférieure et la croûte océanique dont dites "basiques". Quartz + Pyroxènes + Oxydes.

La partie superficielle de la croûte continentale supérieure (quelques milliers de mètres) est constituée principalement de sédiments et de roches sédimentaires métamorphisées à la base de cette partie mais l'essentiel est formé de roches magmatiques granitiques, d'où parfois le nom de croûte "granitique" et de roches métamorphiques.

Le manteau

Le manteau a moins de silice (40% seulement de sa composition) que dans la croûte; il est donc très "basique". Il contient une forte proportion de magnésium; d'où l'attribution du nom SIMA au manteau. Sa partie supérieure est constituée de péridotites et sa partie inférieure a, probablement, la même composition que le manteau supérieur mais les atomes sont assemblés selon des structures plus denses (plus compactes) du fait de l'augmentation de la pression.

Du point de vue minéralogie :

- Le sommet du manteau supérieur est constitué d'Olivine + Pyroxènes + Oxydes
- La base du manteau supérieur est constitué de Spinelle (Olivine très dense) + Pyroxènes + Oxydes

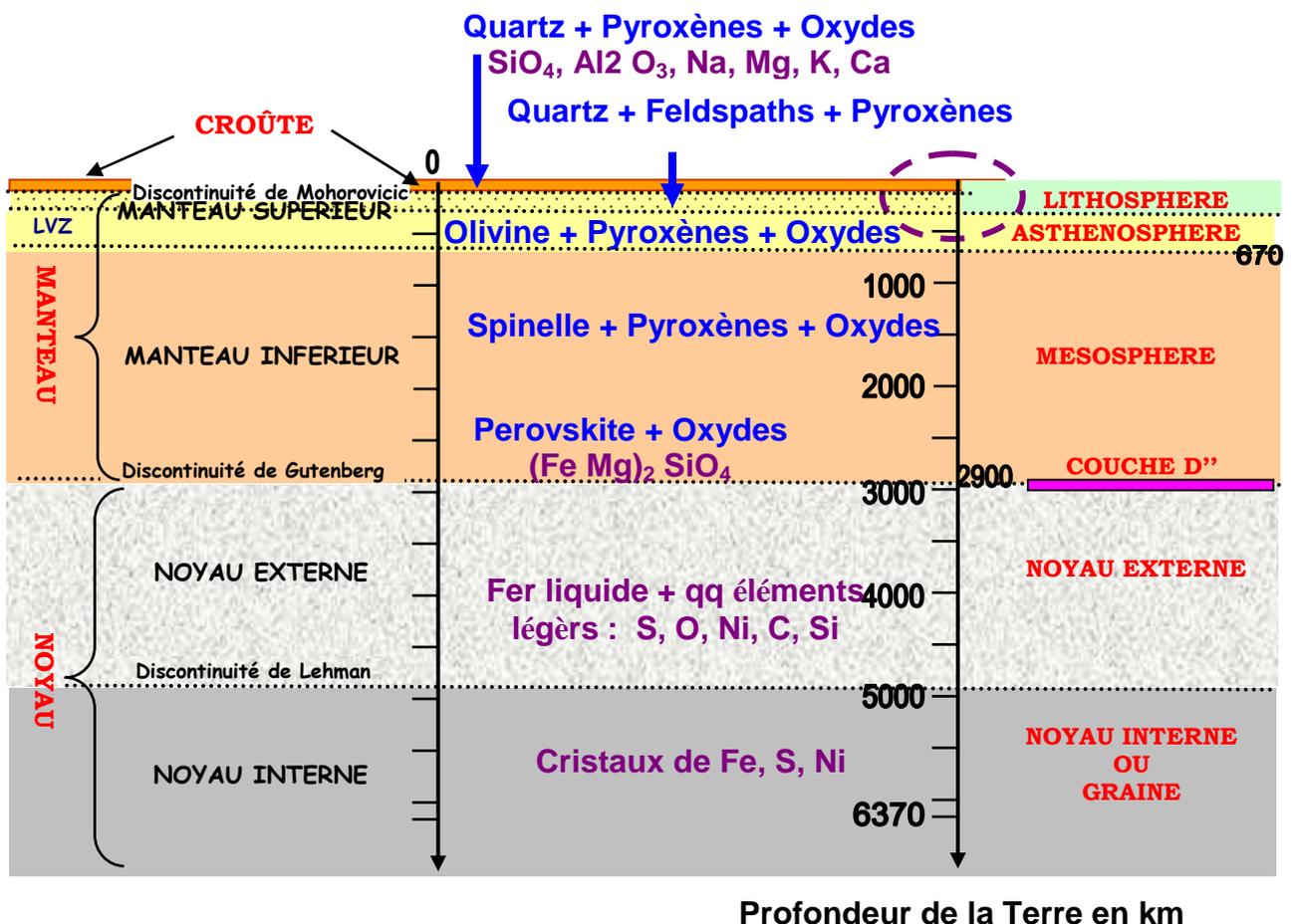
Le manteau inférieur est constitué de Pérovskite (Olivine très très dense) + Oxydes

Le noyau

Le noyau interne serait constitué d'élément sidérophiles : beaucoup de fer, nickel, cobalt, or, platine, etc...;

Le noyau externe ("liquide") serait constitué d'une forte proportion de fer associé à des éléments légers tels que l'oxygène, le soufre; et un peu de silice.

Fig.5 : Répartition des éléments chimique et des minéraux à l'intérieur de la Terre



III - MODELE THERMIQUE DE LA TERRE

La température croît avec la profondeur. On parle de gradient géothermique qui est égal en moyenne à 10°C/ km dans les zones stables de la croûte continentale et à 30°C/ km dans les zones de déformation. Si le gradient était constant en profondeur on aboutirait à une température très très élevées, incompatible avec son état solide de la graine.

La production de chaleur interne par la Terre est essentiellement la conséquence de la désintégration radioactive.

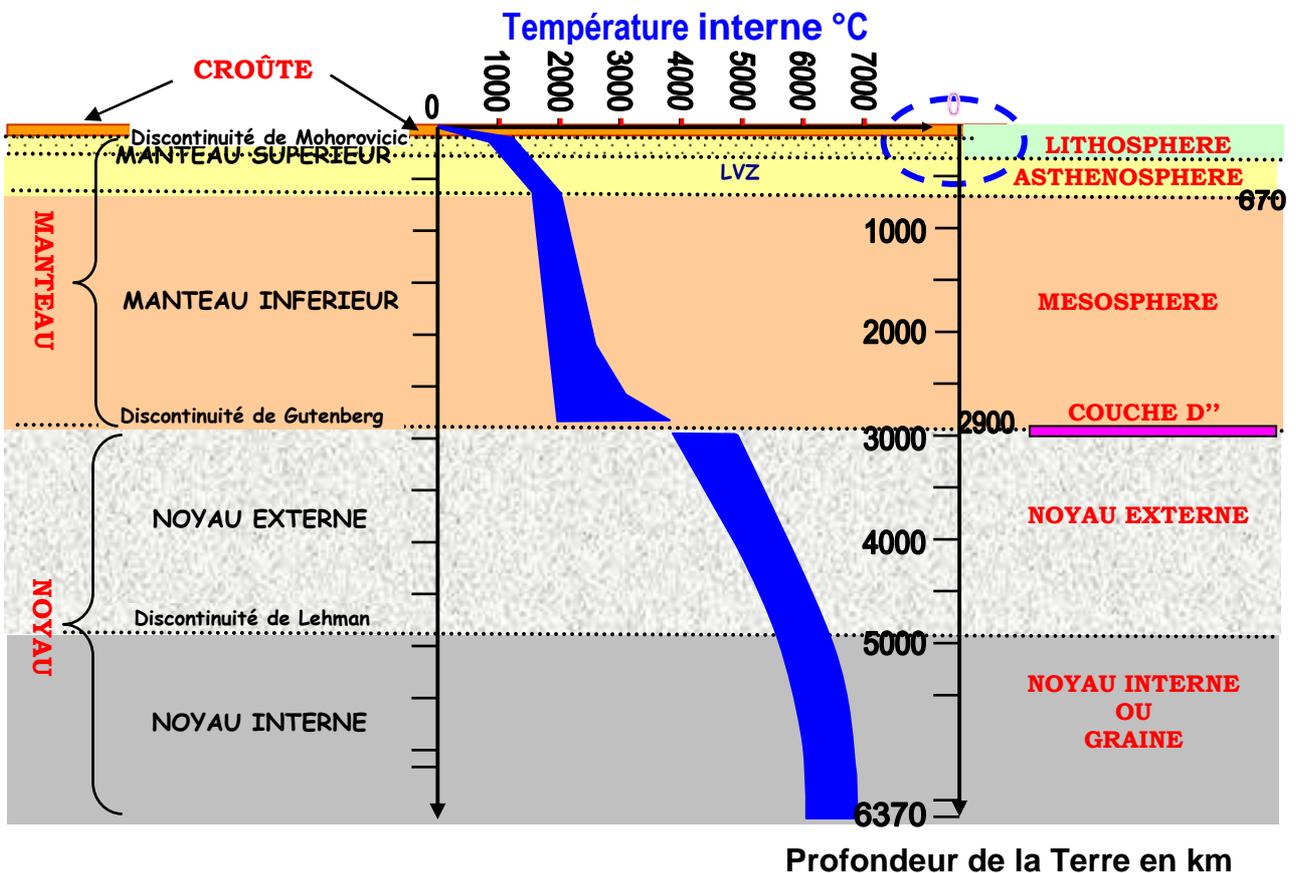
Le flux moyen de la chaleur interne est d'environ 70 mégawatt par m² ; soit au total 42,3 TéraWatt (1TW = 1000 Gigawatt). Le flux de chaleur est la quantité de chaleur, en Joule, traversant l'unité de surface par unité de temps (J./s/ m² = W./m²)

Le transport de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur est un processus complexe qui s'effectue principalement par *conduction* dans les couches limites thermiques (lithosphère, limite noyau-manteau) et par *convection* à l'échelle des temps géologiques dans les couches capables de se déformer par fluage (manteau, noyau).

L'énergie interne produite par la Terre est la source de tous les phénomènes internes qui s'y produisent : tectonique des plaques, séismes, volcanisme, variation du champ magnétique terrestre et du champ de pesanteur.

Le profil de la température en fonction de la profondeur (appelé géotherme) de la figure n°6 ci-après a été estimé grâce aux expériences sur les minéraux de hautes pressions qui ont permis d'une façon indirecte de connaître les températures qui règnent dans les profondeurs de la Terre.

Fig.6 : Répartition de la chaleur à l'intérieur de la Terre



D'après Jeanloz, 1988

| <i>Zone</i> | <i>Température</i> | <i>profondeur</i> |
|------------------------------------|--------------------|-------------------|
| <i>base de croûte Continentale</i> | 700 °C | 30 km |
| | 1000° C | 70 km |
| <i>base de lithosphère</i> | 1350° C | 100 km |
| <i>limite manteau Inf/Sup.</i> | 1600° C | 670 km |
| <i>limite manteau/noyau</i> | 4700° - 5500° C | 2900 km |
| <i>limite noyau/graine</i> | 5500° - 7200° C | 5100 km |
| <i>centre de la Terre</i> | 6600° ± 1000° C | 6370 km |

III – MODELE DYNAMIQUE DE LA TERRE

1) – La tomographie sismique

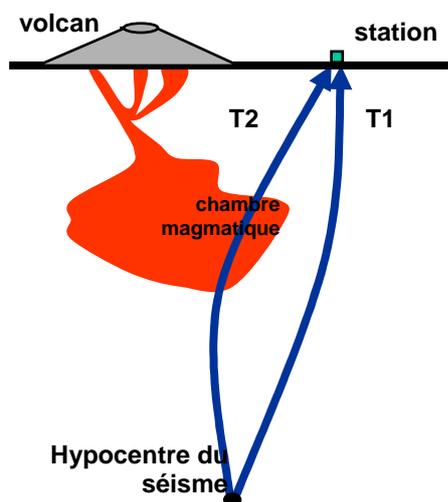
Depuis quelques années on commence à obtenir encore plus de détails sur la structure du globe, et ce grâce à l'accroissement considérable du nombre de données sismiques numériques.

Ces données permettent d'établir une *tomographie sismique* c'est-à-dire une sorte de scanner des profondeurs de la Terre.

Le principe de la tomographie sismique est basé sur la récupération des *résidus des temps* d'arrivée des ondes sismiques qui seront transformés – grâce au recours à l'ordinateur - en images tridimensionnelles.

Le résidu de temps $\Delta t = \Delta t_{\text{théorique}} - \Delta t_{\text{observée}}$ = mesure des écarts de vitesse de propagation des ondes par rapport à une structure moyenne du globe terrestre (fig.7).

Fig.7 : Schéma expliquant le principe de la tomographie sismique



$$\Delta T_1 = \Delta T_1 \text{ théorique} - \Delta T_1 \text{ observée} = 0$$

$$\Delta T_2 = \Delta T_2 \text{ théorique} - \Delta T_2 \text{ observée} \neq 0$$

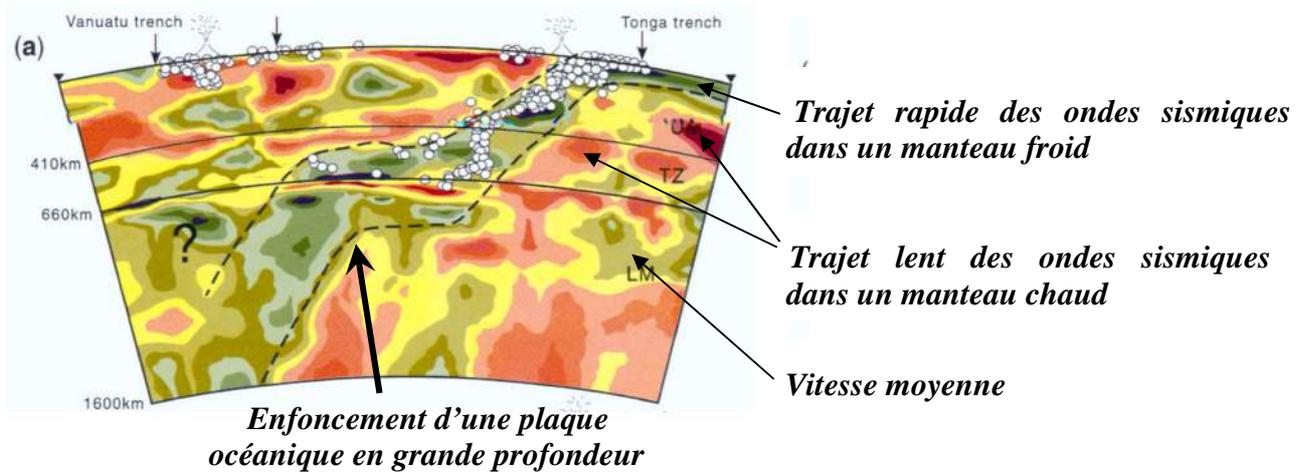
$$\text{si } \Delta T_2 < 0 \rightarrow \Delta T_2 \text{ théorique} < \Delta T_2 \text{ observée}$$



temps de parcours dans le milieu réel plus lent que celui prédit par le modèle de la Terre

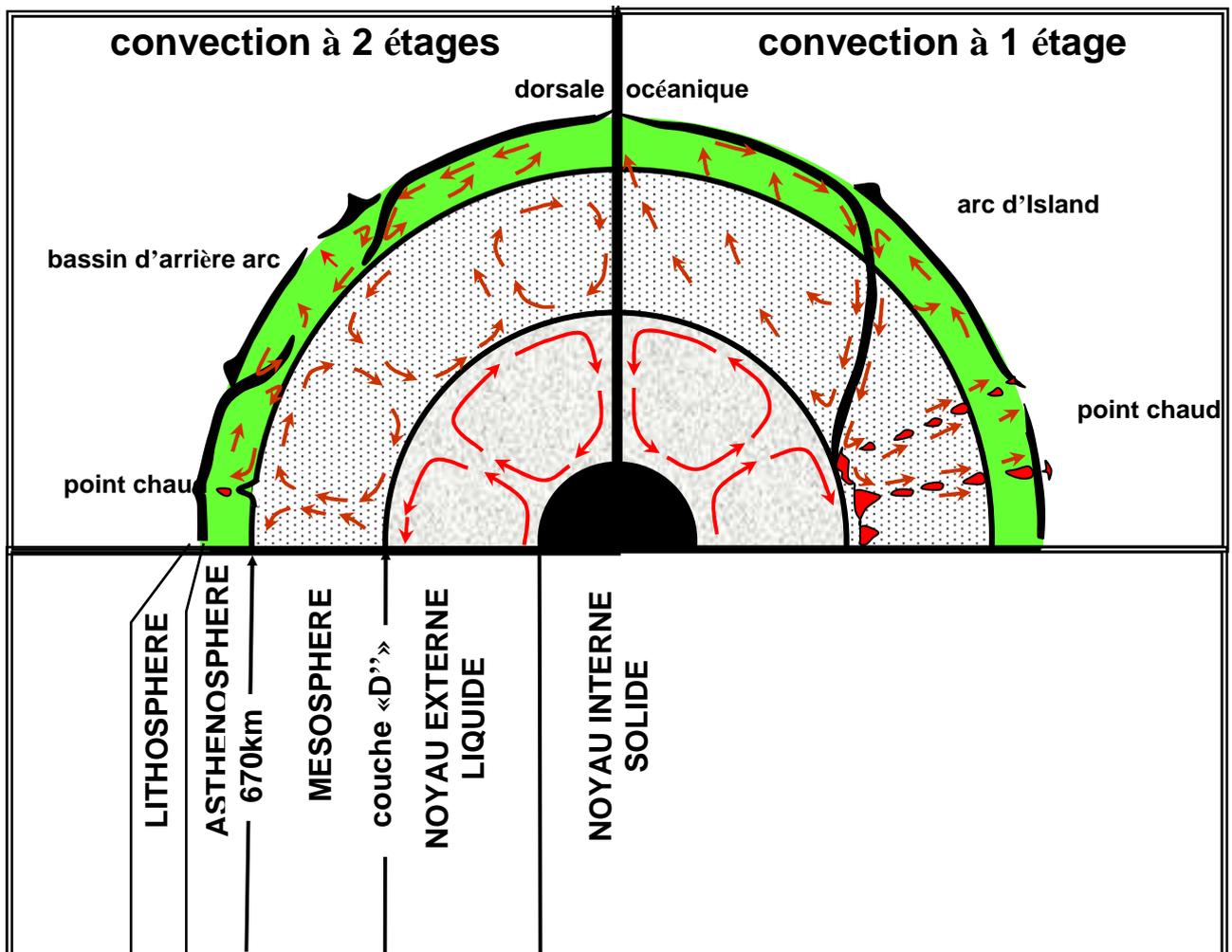
En mettant en évidence de manière détaillée la variation de la vitesse des ondes à l'intérieur du globe; sachant que les ondes sismiques ralentissent dans les zones chaudes et elles sont rapides dans les zones froides (fig.8), la tomographie sismique révèle que le manteau n'est pas homogène et qu'il est, par endroit, anormalement chaud.

Fig .8 : Profil tomographique d'une portion de la Terre au Sud de l'Asie



2) – La convection

Fig. 9 : Deux modèles possibles de la circulation de la matière au niveau du manteau (Philpots, 1990)



3) – la dynamique du noyau

Le noyau externe liquide, en fusion et conducteur, est le siège de mouvements de matière par courants de convection. Ces mouvements se produisant dans le champ géomagnétique préexistant ; il en résulte des courants électriques qui, à leur tour, induisent un champ magnétique et ainsi de suite. Autrement dit il s'agit là d'une dynamo auto-excitatrice (auto-entretenu)

Le démarrage de cette "dynamo" ainsi (dans les premiers temps de l'histoire de la Terre, une fois le noyau formé) a évidemment nécessité l'existence préalable d'un champ magnétique (le champ initial) dont la naissance reste une énigme.

Le champs magnétique terrestre assure une bonne protection de la planète contre le vent solaire. De ce fait le dipôle est en réalité déformé par le vent solaire (TD).

Eléments de cours de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 6

GEOCHRONOLOGIE

La *géo*chronologie (ou géologie historique) est une discipline basée sur la *stratigraphie*. Celle-ci est une science qui étudie la succession des dépôts sédimentaires généralement arrangés en couches ou "*strates*". Chaque couche géologique est caractérisée par son contenu lithostratigraphique et biostratigraphique :

-la *lithostratigraphie* = la description du contenu lithologique des couches. La nature des roches sédimentaires nous informe sur le milieu de sédimentation et comment cet environnement a évolué dans le temps.

-la *biostratigraphie* = la description des fossiles que contient une strate dont l'unité est la *biozone* (faune et flore relatives à un temps). Elle nous renseigne sur l'évolution de ces fossiles dans le temps et dans l'espace dans leur environnement sédimentaire.

- notion de faciès (voir TD)

La *chronostratigraphie* consiste à définir les intervalles de temps des strates et à retracer les différentes évolutions paléogéographiques

Pour repérer un événement passé (=Paléogéographie), on peut:

- le situer par rapport à un autre c'est-à-dire établir sa *chronologie relative* (les mammifères sont apparus *après* les reptiles).

- ou bien indiquer la date à laquelle il s'est produit c'est-à-dire établir sa *chronologie absolue* (les mammifères *sont apparus il y a* 200 millions d'années).

I - CHRONOLOGIE RELATIVE

La stratigraphie permet de reconstruire les événements géologiques grâce à l'établissement d'une chronologie relative des terrains par l'application des principes suivants :

1°) - Principe d'actualisme :

Les lois régissant les phénomènes géologiques actuels étaient également valables dans le passé.

2°) - Principe de superposition,

Dans leur disposition originelle, les strates sont généralement horizontales, et superposées dans l'ordre chronologique de leur dépôt. On dit qu'elles sont en *superposition normale* (*concordantes*), c'est-à-dire que chaque couche est plus ancienne que celle qui la recouvre (fig.1).

Une strate est définie par sa limite supérieure (toit), sa limite inférieure (mur) et son épaisseur.

La disposition des âges dans une carte géologique, suit le principe de superposition : terrains plus jeunes en haut, et les plus vieux en bas.

3°) - Principe de continuité

Une couche, définie par un faciès donné (ensemble des conditions de dépôt du sédiment ayant donné naissance à la roche), est de même âge sur toute son étendue (fig.2).

4°) – Principe d'identité paléontologique

Deux couches ou deux séries de couches sédimentaires de même contenu paléontologique en fossiles stratigraphiques (et de lithologie différente ou pas) ont le même âge (fig.3).

Les fossiles sont caractérisés par une extension géographique maximale et une extension chronologique minimale.

Les "mauvais" fossiles présentent une forme constante pendant une longue durée.

5°) - Principe de recoupement

Un objet géologique qui recoupe un autre lui est postérieur. Il peut s'agir d'une intrusion de roches plutonique ou éruptives qui recoupe des couches précédemment déposées dans un bassin sédimentaire (fig.4).

6°) – Principe de « recouvrement »

Une structure (couche sédimentaire ou volcano-sédimentaire ou coulée volcanique...) qui en recouvre une autre (déformée ou pas) est postérieure à cette dernière

Une des applications importantes de ce principe est la notion de *discordance* stratigraphique.

On appelle *discordance*, une limite qui exprime une l'interruption dans la sédimentation pendant un intervalle de temps. Elle peut se présenter par sous deux formes :

- La *discordance de ravinement* représentée par une surface irrégulière d'érosion entre des strates parallèles. Cette surface exprime la cessation de la sédimentation plus leur ravinement (érosion) mais sans déformation (fig.5).

- La *discordance angulaire* représentée par une surface d'érosion recoupant d'anciennes séquences déformées. Cette discordance implique le plissement (ou le basculement) et le soulèvement, l'érosion d'anciennes couches sur lesquelles reposent de nouvelles couches. Souvent les strates récemment déposées se trouvent directement au-dessus de roches ignées ou métamorphiques intercalées dans la série plissée (fig.6).

7°) – Les critères de polarité des couches

Pour déterminer si une série de couches est en superposition normale ou inverse, on compare l'âge de ces couches d'après les fossiles stratigraphiques qu'elles contiennent. Si ces derniers n'existent pas (couches azoïques), on utilise des *critères sédimentaires de polarité des couches*. Il s'agit d'un ensemble de figures sédimentaires permettant de distinguer le sommet (le haut = la partie la plus récente) de la base (le bas = la partie la plus ancienne) d'une strate ou d'une série de couches. Ces critères de polarité sont nombreux et de différentes natures dont voici quelques exemples (fig.7):

- ~ granoclassement décroissant (7a),
- ~ ravinement indiquant une surface d'une couche (7b),
- ~ fragments d'une couche contenus dans une autre couche, celle-ci est alors la plus récente des deux (7c);
- ~ figures de charges et empreintes vermiformes saillantes sur la surface basale des couches (7d).
- ~ lits concaves qui indiquent le haut d'une couche, dans un dépôt à stratification oblique tronqué dans sa partie supérieure (7e);
- ~ étude des fossiles dans leur environnement :
 - fossiles ayant conservé leur position de vie pendant la sédimentation (7f);
 - remplissage des coquilles (7g)

II - CHRONOLOGIE ABSOLUE

1°) - Introduction

La chronologie absolue de mesurer des durées des phénomènes géologiques et des objets géologiques (roche, minéral) grâce à des techniques qui s'appuient sur la **désintégration radioactive** d'isotopes de certains éléments chimiques. La radioactivité correspond à des changements naturels ou artificiels du nombre de protons et de neutrons de noyaux dits instables.

On appelle **isotopes**, les atomes d'un élément qui contiennent des nombres différents de neutrons. On identifie un isotope par son **nombre de masse**, qui représente la somme des neutrons plus protons. Par exemple, tous les atomes de carbone contiennent 6 protons, mais ces derniers peuvent se lier à 6, 7, ou 8 neutrons.

Les isotopes radioactifs majeurs **P** (pères) et leurs produits **F** (fils) utilisés en géologie sont $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$, $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ (pour les longues durées) et $^{14}\text{C}/^{14}\text{N}$ pour les courtes durées).

Le tableau ci-après donne une idée sur les tranches d'âge pouvant être obtenues en étudiant quelques couples d'isotopes:

| COUPLES D'ISOTOPES | PERIODES | AGES MESURES |
|------------------------------------|--------------|------------------|
| $^{238}\text{U} / ^{206}\text{Pb}$ | 4,47 GA | > 25 MA |
| $^{87}\text{Rb} / ^{87}\text{Sr}$ | Sr 48,8 GA | > 100 MA |
| $^{40}\text{K} / ^{40}\text{Ar}$ | 1,31 GA | 1 à 300 MA |
| $^{14}\text{C} / ^{14}\text{N}$ | 5 730 années | 100 à 50 000 ans |

2°).- Principe de datation radiométrique

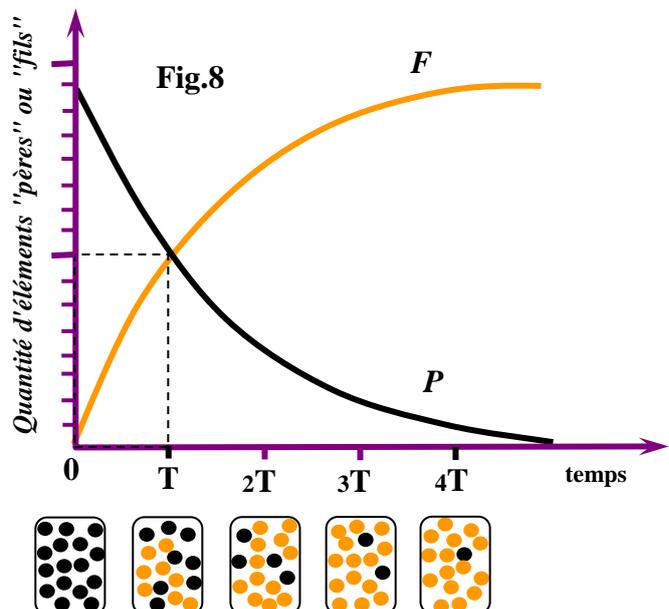
La loi de la désintégration est la même pour chaque élément radioactif même si le taux de désintégration varie d'un élément à un autre.

Un élément **P** radioactif se désintègre progressivement en élément **F**. Cette désintégration est beaucoup plus abondante qu'il s'est écoulé plus de temps

La figure 8 montre que la proportion d'atomes pères (P) qui se désintègrent pendant chaque unité de temps (dt) est toujours la même. Le nombre d'atomes pères se désintégrant diminue de manière continue en même temps que le nombre d'atomes fils augmente proportionnellement.

- A $t=T$, il ne reste plus que 8 isotopes noirs, 8 isotopes blancs ont été produits.
- A $t=2T$, il ne reste plus que 4 noirs pour 12 blancs,
- A $t=3T$, il ne reste plus que 2 noirs pour 14 blancs,
- A $t=4T$, il ne reste plus que 1 noir pour 15 blancs

On est parti d'un système à 16 éléments isotopiques et il y en a toujours 16 dans le système : on dit que le système est **clos** ou **fermé**, il n'y a pas d'apport extérieur ou de pertes.



La désintégration de l'élément \mathbf{P} suit une loi exponentielle exprimée par une équation qui décrit le changement ($d\mathbf{P}$) du nombre d'atomes pères (\mathbf{P}) par intervalle de temps (dt):

$d\mathbf{P}/dt = -\lambda \cdot \mathbf{P}_0$ où \mathbf{P}_0 est le nombre initial d'atomes pères et \mathbf{P} le nombre d'atome à l'instant t et λ est la *constante de désintégration* de l'élément radioactif et elle s'exprime en an^{-1} .

Cette équation s'intègre en fonction du temps : $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 e^{-\lambda t}$ ou bien $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P} e^{\lambda t}$

Comme $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P} + \mathbf{F}$, l'intégration de cette équation donne $t = 1/\lambda \cdot \log_n (1 + (\mathbf{F}/\mathbf{P}))$ (I)

Chaque élément radioactif, est également, caractérisé par sa *période ou demi-vie* \mathbf{T} au bout de laquelle la moitié de l'élément père \mathbf{P} s'est désintégré. $\mathbf{P}_0/2 = \mathbf{P}_0 e^{-\lambda T} \dots \dots \dots \lambda = \log_n 2/\mathbf{T}$.

En général, nous ne connaissons pas la valeur de \mathbf{P}_0 , mais nous pouvons mesurer le nombre d'atomes pères \mathbf{P} et celui de fils \mathbf{F} dans un échantillon. On détermine alors le rapport \mathbf{F}/\mathbf{P} ; ce qui suppose que l'élément \mathbf{F} n'est pas lui-même radioactif.

Dans la pratique on utilise la formule $t = 1/\lambda \cdot \log_n (1 + (\mathbf{F}/\mathbf{P}))$

Dans beaucoup de cas il faut tenir compte du fait que des isotopes \mathbf{F} peuvent exister au départ (\mathbf{F}_0) dans la roche indépendamment de la radioactivité de \mathbf{P} . On a alors : $\mathbf{F} = \mathbf{F}_0 + \mathbf{F}^*$

\mathbf{F}^* est le produit de désintégration de \mathbf{P} , on a : $\mathbf{F}^* = \mathbf{P}_0 - \mathbf{P}$

Comme $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 e^{-\lambda t}$ ou bien $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P} e^{\lambda t}$

On aura : $\mathbf{F}^* = \mathbf{P} (e^{\lambda t} - 1)$ et donc $\mathbf{F}_{\text{mesuré}} = \mathbf{F}_0 \text{ initial} + \mathbf{P}_{\text{mesuré}} (e^{\lambda t} - 1)$ (II)

3°) - Méthodes de datation des périodes anciennes

3.1 La méthode Rb (rubidium) / Sr (strontium)

Lors de la formation d'une roche magmatique, du rubidium et du strontium sont intégrés dans les réseaux cristallins de certains minéraux (micas, feldspaths). Chacun de ces éléments se présente sous plusieurs formes isotopiques : ^{85}Rb et ^{87}Rb d'une part, ^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr et ^{84}Sr d'autre part.

L'isotope ^{87}Rb , radioactif, se désintègre en donnant ^{87}Sr : ($\mathbf{T} = 48,8$ milliards d'années et $\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$).

Or on ne connaît pas la quantité initiale de ces éléments dans les minéraux de la roche à la fermeture du système, que ce soit celle de \mathbf{P} ou celle de \mathbf{F} qui n'est pas nulle au départ. Dans ce cas on applique l'équation II ($\mathbf{F}_{\text{mesuré}} = \mathbf{F}_0 \text{ initial} + \mathbf{P}_{\text{mesuré}} (e^{\lambda t} - 1)$) qui devient :

$$^{87}\text{Sr}_{\text{mesuré}} = ^{87}\text{Sr}_0 \text{ initial} + ^{87}\text{Rb}_{\text{mesuré}} (e^{\lambda t} - 1) :$$

On dispose ainsi d'une équation à deux inconnues : la quantité $^{87}\text{Sr}_0 \text{ initial}$ et le temps t de désintégration du ^{87}Rb en ^{87}Sr qu'il faut résoudre.

Pour cela, il faut comprendre que deux minéraux (ou deux roches) cristallisant à partir d'un même magma intégreront dans leur réseau cristallin du strontium avec un rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ identique à celui du magma d'origine. On dit que ces échantillons sont *cogénétiques*.

Sachant que ^{87}Sr est stable et que ^{86}Sr n'est ni radioactif ni radiogénique, la quantité de cet isotope ne varie pas au cours du temps dans un système clos et $^{86}\text{Sr} = ^{86}\text{Sr}_0$. Si on divise toute l'équation par le nombre de l'isotope ^{86}Sr , l'équation devient donc :

$$\{ ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \}_{\text{mesuré}} = \{ ^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr} \}_{\text{initial}} + \{ ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} \}_{\text{mesuré}} \times \{ (e^{\lambda t} - 1) \} \text{ (équation III)}$$

On admet que la valeur de ce rapport au moment de la fermeture du système était la même que dans un organisme vivant actuel. ^{14}C C étant stable, le rapport $^{14}\text{C}_{\text{initial}} / ^{12}\text{C}_{\text{initial}}$ connu et $^{14}\text{C}_{\text{actuel}} / ^{12}\text{C}_{\text{actuel}}$ mesuré donne la valeur du rapport $^{14}\text{C}_{\text{initial}} / ^{14}\text{C}_{\text{actuel}}$.

L'âge de l'échantillon est donné par la formule :

donne $t = \log_n (^{14}\text{C}_{\text{initial}} / ^{14}\text{C}_{\text{actuel}}) \times T / \log_n 2$

III – L'ECHELLE DES TEMPS GEOLOGIQUES

La biostratigraphie et les méthodes de géochronologie permettent de reconstituer l'histoire géologique d'une région donnée. Les recoupements généralisés à l'échelle du globe ont permis d'établir un calendrier de référence appelée *échelle stratigraphique internationale des temps géologiques* basée, à la fois sur la géochronologie relative et absolue. Dans son **édition de 2014**, cette échelle présente les subdivisions suivantes en millions d'années (ma) :

1°) - Eons (=Eonothèmes)

Un *éon* représente l'intervalle de temps géologique le plus grand de plusieurs centaines de millions d'années. Il en existe quatre. Du plus ancien au plus récent on distingue :

- Le *Hadéen* couvre le début de l'histoire de la Terre (-4600 ma à -4000 ma). Il n'existe pas de roches de cette âge à cause de l'érosion et de la subduction.

- L'*Archéen* (-4000 ma à -2500 ma) qui représente les roches les plus anciennes sur Terre - ces roches contiennent des traces d'organismes microscopiques (bactéries).

- Le *Protérozoïque* (-2500 ma à -541 ma) suit l'Archéen et ses roches contiennent des traces de micro-organismes multicellulaires mais il y manque certaines parties solides. La stratigraphie des roches archéennes et protérozoïques est moins connue que celle des roches plus jeunes parce que ces roches anciennes ont été déformées, métamorphosées et érodées.

- Le *Phanérozoïque* (-541 ma à aujourd'hui) est l'éon le plus récent. Les roches du Phanérozoïque contiennent beaucoup d'évidence de vie et les parties solides des organismes sont bien fossilisées.

Les trois premiers éons, groupés, sont connus sous le nom de *Précambrien*.

2°) - Eres (= Erathèmes)

Les éons sont subdivisés en *ères* dont les limites sont marquées par de grands bouleversements biologiques (grandes extinctions), paléogéographiques (Orogenèse) ... Une ère géologique reprend l'intervalle de temps défini sur base des organismes présents dans ces roches.

- L'*éon hadéen* n'est pas subdivisé en ères car on n'a pas encore de repères.

- L'*éon archéen* est subdivisé en 4 ères : l'*Eoarchéen* (-4000 ma à -3600 ma), le *Paléoarchéen* (-3600 ma à -3200 ma) le *Mésarchéen* (-3200 ma à -2800 ma) et le *Néoarchéen* (-2800 ma à -2500 ma).

- L'*éon protérozoïque* est subdivisé en 3 Eres : le *Paléoprotérozoïque* (-2500 ma à -1600 ma), le *Mésoprotérozoïque* (-1600 ma à -1000 ma), et le *Néoprotérozoïque* (-1000 ma à -541 ma).

- L'*éon phanérozoïque* est subdivisé 3 Eres: le *Paléozoïque* (vie ancienne - 541 ma à -252,1 ma), le *Mésozoïque* (vie intermédiaire -252,1 ma à -66 ma) et le *Cénozoïque* (vie récente - 66 ma à aujourd'hui).

Au Paléozoïque, les formes de vie incluent des invertébrés marins, des poissons, des amphibiens, et des reptiles. Certaines plantes y ont également apparu et évolué. Le Mésozoïque est l'ère des dinosaures qui sont devenus les vertébrés les plus importants. Des mammifères sont apparus vers la fin du Mésozoïque et dominent le Cénozoïque.

3°) - Les périodes (=Systèmes)

Les dernières regroupent des étages sur des références lithologiques (Carbonifère, Crétacé), paléontologiques (Nummulitique = Paléogène) ou autres.

Les ères archéennes ne sont subdivisées en périodes faute de repères stratigraphiques et/ou paléontologiques alors que celles des éons protérozoïque et phanérozoïques montrent plusieurs périodes :

- L'ère paléoprotérozoïque comprend 4 périodes : le *Sidérien* (-2500 ma à -2300 ma), le *Rhacyien* (-2300 ma à -2050 ma), l'*Orosirien* (-2050ma à -1800 ma) et le *Stathérien* (-1800ma à -1600 ma).

- L'ère mésoptérozoïque comprend 3 périodes : le *Calymmien* (-1600 ma à 1400 ma), l'*Ectasien* (-1400 ma à -1200 ma), le *Sténien* (-1200 ma à -1000 ma),

- L'ère néoprotérozoïque comprend 3 périodes : le *Tonien* (-1000ma à -850 ma), le *Cryogénien* (850ma à -635 ma), l'*Ediacardien* (-635 ma à -541 ma).

- L'ère Paléozoïque est subdivisé en 6 périodes : le *Cambrien* (-541 ma à -485,4 ma), l'*Ordovicien* (485,4ma à 443,4 ma), le *Silurien* (-443,4ma à -419,2 ma), le *Dévonien* (-419,2 ma à -358,9 ma), le *Carbonifère* (-358,9 ma à -298,9 ma) et le *Permien* (-298,9 ma à -252,1 ma), A signaler ici que le Carbonifère est subdivisé en 2 sous-périodes : Le *Mississipiien* et le *Pennsylvanien*.

- L'ère Mésozoïque comprend 3 périodes : le *Trias* (-252,1 ma à -201 ma), le *Jurassique* (-201ma à -145 ma) et le *Crétacé* (-145 ma à 66 ma),

- L'ère Cénozoïque comprend 3 périodes : le *Paléogène* (-66 ma à -23,03 ma), le *Néogène* (-23,03 ma à -2,58 ma) et le *Quaternaire* (-2,58 ma à aujourd'hui).

4°) - Les époques (=Séries)

Les *périodes* sont subdivisées en *époques* sur la base d'association de fossiles stratigraphiques spécifiques. Leur durée moyenne est d'environ 15 Ma (sauf pour le Quaternaire).

Leurs limites suivent les mêmes règles que pour les Périodes (pour plus de détail voir TD).

Désignation : adjectif inf., moyen, sup. (Crétacé inf., sup.) ou encore « -cène » (Eocène, Oligocène).

5°) - Les étages (=Ages)

Les étages successifs sont désignés par un nom de lieu qui évoque le **stratotype** (formation géologique référencée mondialement qui a caractérisé cette période). Plusieurs étages forment une *époque*. Le nom de l'étage est le plus souvent dérivé de celui d'un lieu géographique ou historique, actuel ou antique auquel on ajoute le suffixe *ien*.

Eléments de cours de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 7

HISTOIRE DE LA TERRE

PREMIER EPISODE : LE PRECAMBRIEN

C'est la période géologique la plus grande ; elle représente près de 80 % de l'histoire de la Terre. Actuellement, les roches précambriennes sont concentrées dans des zones constituées de parties plus anciennes de la croûte terrestre appelées *cratons*. Ces derniers affleurent dans différents endroits du globe terrestre qu'on appelle « boucliers » (fig.1).

L'ère précambrien est subdivisé en trois unités chronologiques appelées Eons :

- Le *Hadéen* qui n'a pas de témoins stratigraphiques,
- L'*Archéen* caractérisé par les roches les plus primitives de la Terre,
- Le *Protérozoïque* marqué par de nombreux événements géologiques et biologiques.

NB : Les grands événements du Précambrien sont résumés dans le tableau ci-joint.

1. - LE HADEEN : - 4 600 Ma - 3 800 Ma

1.1 - Pluie d'objets cosmiques

Le début de l'éon hadéen correspond à la formation de notre système solaire. Durant les premiers 100 Ma qui vont suivre, la Terre (et la Lune) va subir une pluie intense d'objets cosmiques : poussières, cailloux, astéroïdes et planétoïdes qui font augmenter sa masse, son volume et son attraction. Les vestiges de cet événement sont observés actuellement sur la surface lunaire qui n'a pas subi –contrairement à la Terre- de grands changements depuis cette époque.

1.2. - Augmentation de la température

Les impacts de tous ces objets cosmiques sur la surface de notre planète ont libéré des quantités considérables de chaleur qui a fendu la surface de la Terre jusqu'à une profondeur de plus de 400 km (fig.2).

Une autre source de chaleur provient de la désintégration progressive des éléments radioactifs emprisonnés dans les roches.

D'immenses volcans prennent naissance en crachant des torrents de laves et des panaches gigantesques de gaz et de vapeur d'eau.

La Terre était donc une immense boule de feu constituée de fleuves de lave et de plaines en fusion et elle était animée par de violentes explosions.

1.3 - Différenciation par gravité

Ce processus, déjà ébauché au moment de la formation de la Terre, se réactive après la formation de la Lune et poursuit durant tout le Hadéen, au fur et mesure de la diminution lente de la température.

- ~ les éléments les plus lourds comme le fer et le nickel se concentrent au centre pour former le noyau.
- ~ Les silicates plus légers se rassemblent autour du noyau en constituant le manteau.
- ~ Les éléments volatiles, comme l'azote, l'hydrogène, l'eau, se dégagent à la périphérie en se mélangeant à d'autres constituant de l'atmosphère primitive

1.4 - Formation de la croûte primitive

Vers - 4000 MA, à la suite d'un refroidissement lent, la terre devient d'abord pâteuse, puis la couche superficielle durcit et résiste de mieux en mieux aux chocs. Elle se développe à partir du manteau supérieur sur quelques centaines de mètres d'épaisseur et contient des éléments légers de composition chimique proche de celle des météorites pierreuses (aérolithes).

On a obtenu un âge de 3.960 MA sur un gneiss canadien. Cela montre d'une part qu'une croûte continentale existait déjà et qu'il y avait aussi des agents géologiques externes pour l'éroder et donner des roches sédimentaires. On peut donc déduire que l'hydrosphère était déjà présente au Hadéen.

1.5 - Hydrosphère

La vapeur d'eau issue du dégazage du manteau et présente dans l'atmosphère primitive, finit par donner naissance, à la suite d'un abaissement important de la température, à un réseau hydrographique et à des bassins sédimentaires.

A cette époque l'hydrosphère primitive contenait des matières minérales très diversifiées avec une quantité très importante de CO₂ dissous (HCO₃) et de Fer. Ce dernier, issu des météorites, n'avait pas les conditions nécessaires pour migrer vers le noyau de la Terre. Il a été lessivé par le réseau hydrographique.

1.6 - Atmosphère primitive

La formation de l'atmosphère ne provient pas de la capture des gaz de la nébuleuse primitive. Les éléments atmosphériques sont issus du dégazage du manteau qui se poursuit actuellement à l'occasion des activités volcaniques. En effet, le rapport isotopique des gaz rares tel que l'argon a abouti à cette conclusion grâce aux valeurs suivantes :

- météorites : $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} \rightarrow 10^{-2} - 10^{-4}$
- atmosphère : $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} \rightarrow 296$
- volcans sous-marins : $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} \rightarrow 20\ 000$

En effet, le rapport isotopique d'autres gaz rares, a permis de conclure que 80 à 85 % de l'atmosphère actuelle a été formé pendant le premier million d'années de la formation de la Terre, à partir du dégazage du manteau lors des activités volcaniques.

L'atmosphère primitive est anoxique ; elle était composée de CO₂, d'azote, de l'eau et des traces de méthane, d'ammoniac, de SO₂, de HCl mais sans oxygène libre. Le CO₂ et le méthane ont induit un effet de serre. L'hydrogène et l'hélium, plus légers, ont été progressivement dispersés dans l'espace.

L'atmosphère primitive était le siège d'importants orages, accompagnés de pluies acides induites par le CO₂, le HCl et le SO₂ atmosphériques.

1.7 - Vie primitive

Sur les fonds marins peu profonds et sous l'action de diverses formes d'énergies, commence *la synthèse abiotique*, c'est à dire la transformation des matières minérales en premières molécules organiques (*molécules prébiotiques*) en formant une couche épaisse. Les interactions chimiques entre molécules ont permis l'apparition de nouvelles espèces moléculaires : acides aminés, oses, acides gras, d'autres molécules importantes comme les Thio esters, les bases puriques, puis certains nucléotides. Ainsi certains peptides ont pu se former par l'assemblage de quelques acides aminés entre eux en donnant naissance l'ARN.

Certains ARN se combinent entre eux, et forment ainsi un ARN plus long et donc des peptides plus longs, parmi lesquelles, certains apportent de nouvelles propriétés. Ainsi une enzyme permettant de fabriquer l'ADN a pu voir le jour.

2. – L'ARCHEEN : - 3.800 Ma – 2.500 Ma

2.2 – Production des continents

Au début la croûte primitive est encore très mobile en raison de forts courants de convection qui animent le manteau. Celle qu'on connaît actuellement commence, dès cette époque, à se former par des phénomènes d'accrétion verticale grâce à une activité magmatique intense d'une part et à l'accumulation de sédiments dans les bassins d'autre part. Ainsi commence la production des continents qui atteint plus de 30% au volume actuel des masses continentales.

Des phénomènes d'érosion et de sédimentation aboutissent à la formation de sédiments qui s'engagent, par la suite, dans un cycle orogénique ; c'est-à-dire elles seront déformées (plissements et fractures polyphasés), métamorphosés et granitisés (mise en place des granites). Il en résulte la formation de chaînes de montagne parmi lesquelles on peut citer la chaîne de l'*orogénèse léonienne* et de l'*orogénèse libérienne* qui caractérise l'Afrique de l'Ouest.

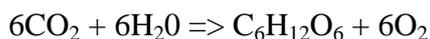
A la fin du dernier cycle orogénique, les continents se sont consolidés en grandes plaques stables : les *cratons*. Ces derniers actuellement affleurent dans certaines parties du globe terrestre qu'on appelle *boucliers* ; ils sont recouverts en discordance angulaire par des sédiments plus récents, généralement paléozoïques, peu ou pas déformés.

2.3 – Apparition des stromatolites

Les formations rocheuses de l'Archéen ont fourni la preuve directe sur les premières traces de la vie il y a 3500 ma. Elles contiennent des roches carbonatées formées de feuillets superposés et se développant en forme de dômes ou de chou-fleur appelés *stromatolites* (fig.1). Il s'agit de constructions fossiles qui résultent de l'activité biologique des algues bleues appelés cyanobactéries ou cyanophycées (fig.2).

Actuellement en Australie et aux Bahamas, on observe des formations de structures semblables dans les milieux marins très salés ou très agités, constituées de dépôts calcaires en feuillets ondulés (fig.3). Le lit le plus récent est constitué d'un tapis de consistance gélatineuse, laminaire, composée d'un treillis de filaments de cyanobactéries (fig.4). Ces dernières remplissent deux fonctions :

- Elles possèdent de la chlorophylle *a* qui leur permet, en présence de lumière et en captant le gaz carbonique (CO₂) dissous dans l'océan, de libérer l'oxygène (O₂) selon la réaction suivante :



- Elles favorisent également la précipitation du calcaire (CaCO₃) en consommant du CO₂, et en captant le calcium marin (Ca⁺⁺) selon la réaction suivante :



Le calcaire précipité servira à cimenter les particules sédimentaires piégées entre les filaments. Ainsi on a une croissance en feuillets verticale du stromatolite avec une alternance de lits sombres riche en matière organique et de lits clairs très carbonatés.

Les cyanobactéries ont donc joué un rôle primordial durant et après l'archéen en nettoyant les océans de l'excès du gaz carbonique et en l'enrichissant en oxygène. Ces derniers se présentent généralement sous forme de sont caractérisés une alternance de lits calcaires (claires) avec des lits calcaires sombres riches en matière organique (fig.2).

2.4 –Précipitation du Fer de l'hydrosphère

Vers 3800 Ma, l'oxygène, produit par les bactéries et les algues bleues, s'est d'abord accumulé dans les bassins sédimentaires où il a été fixé par des éléments oxydables comme le Fer.

La plus grande partie du Fer a ainsi précipité pendant l'Archéen. Ce phénomène s'est poursuivi au début du Protérozoïque (entre -2.500 Ma et -2.000 Ma) pour former les grands gisements de fer rubané du Précambrien qu'on connaît actuellement.

2.5 – Atmosphère

La planète s'est habillée peu à peu d'une atmosphère dense et épaisse mais avec une teneur en O₂ très faible. En effet certains sédiments d'Afrique du sud, datés de -2.700 Ma à -2.500 Ma, sont riches en uraninite (U₃O₈) caractérisant ainsi un milieu sédimentaire deltaïque peu profond et très agité et qui est en équilibre avec l'atmosphère. Si cette dernière contenait de l'O₂, l'Uranite sera déstabilisée car elle est soluble dans l'oxygène.

3. - LE PROTÉROZOÏQUE (-2.500 Ma à -570 Ma)

3.1 – Evolution géologique

Après l'établissement des premiers noyaux continentaux à l'Archéen, le volume de la croûte continentale a augmenté progressivement tout au long du Protérozoïque qui a une durée de près de 2.000 Ma. À la fin du Protérozoïque, le volume des masses continentales avait atteint celui que nous connaissons aujourd'hui. Cette évolution résulte d'un ensemble de phénomènes géologiques durant de plusieurs cycles orogéniques qui ont servi de base pour subdiviser le Protérozoïque en trois époques : le *Protérozoïque inférieur* (*Paléoprotérozoïque* : -2500 à -1600 Ma), le *Protérozoïque moyen* (*Mésoprotérozoïque* : -1600 à -1000 Ma) et le *Protérozoïque supérieur* (*Néoprotérozoïque* : -1000 à -542 Ma).

Dans l'Anti-Atlas Marocain on a mis en évidence deux chaînes orogéniques précambriennes :

- *l'orogénèse éburnéenne* caractérisée par d'anciens dépôts, suivis vers -1800 Ma, de déformations, de granitisations et de métamorphismes de haute pression pendant le protérozoïque inférieur,

- *l'orogénèse panafricaine* pendant le protérozoïque supérieur dont le maximum de déformation a été réalisé vers -900 à -850 Ma.

Vers -2000 Ma et -850 à -650Ma, la planète a connu des glaciations générales qui a modifié le caractère sédimentaire.

Vers -750 Ma la croûte continentale formait un supercontinent qu'on appelle le *Rodinia* (fig.3).

3.2 – Poursuite du dépôt de fer

Le fer rubané archéen, continue à se déposer jusqu'à sa disparition du milieu aquatique puis apparaissent d'autres minerais de fer différents appelés couches rouges continentales. Ces dernières résultent de l'oxydation du fer dans les sols des continents. La différence de milieu de formation a son importance car elle montre clairement qu'avant -2.000 Ma l'atmosphère est dépourvue de O₂.

3.3. – Atmosphère

Grâce à la photosynthèse les cyanobactéries se sont mises à puiser le dioxyde de carbone de l'atmosphère et à le remplacer par de l'oxygène. Ce dernier, sous forme de gaz, s'échappe du milieu aquatique pour enrichir l'atmosphère primitive.

En altitude, sous l'effet des éclairs et des rayonnements UV une partie d'O₂ est transformée en ozone (O₃) qui forme un écran protecteur aux UV. Ainsi à partir de -2.000 Ma, lorsque la concentration en O₂ était égale à 1 % de sa concentration actuelle, les UV ne pénétraient plus dans l'eau au delà de 30 cm. La vie n'est encore possible que dans l'eau.

Vers -1.500 Ma, l'oxygène, se change en ozone qui, progressivement, protégera la surface terrestre des rayons ultraviolets nocifs et permettra à la vie de s'installer sur les continents.

3.4. – Evolution des êtres vivants

Vers -1500 Ma apparaissent les premiers eucaryotes = algues unicellulaires

Vers -800 Ma apparaissent les premiers métazoaires = invertébrés marins peu complexes, et sans test (sans coquille) représentés –entre autre - par des méduses alors que le taux d'O₂ = 5% du taux actuel.

C'est dans un dépôt en Australie (*Ediacara Hills* au Nord d'Adélaïde) daté de -670 à -570Ma qu'on a identifié les premiers métazoaires connus sous le nom de *faune d'Ediacara* (fig.4). Celle-ci est représentée par des organismes à symétrie radiale ou bilatérale, sans structures squelettique, médusoïdes pélagiques et fixées, constitués de feuillets minces indiquant des échanges avec le milieu par diffusion ionique et gazeuse (sans la participation d'organes complexes).

A la fin du Précambrien, la vie se limite au milieu aquatique ; elle est marquée par une très grande diversité d'espèces unicellulaires et pluricellulaires. La plupart des groupes actuels étaient présents à cette époque; d'autres ont disparues depuis, y compris la faune d'Ediacara qui s'est éteinte il y a environ -550 millions d'années. Il faut noter que les algues et les lichens, à cette époque, bordaient les océans.

Fig. 1 : Répartition des terrains précambriens dans notre planète

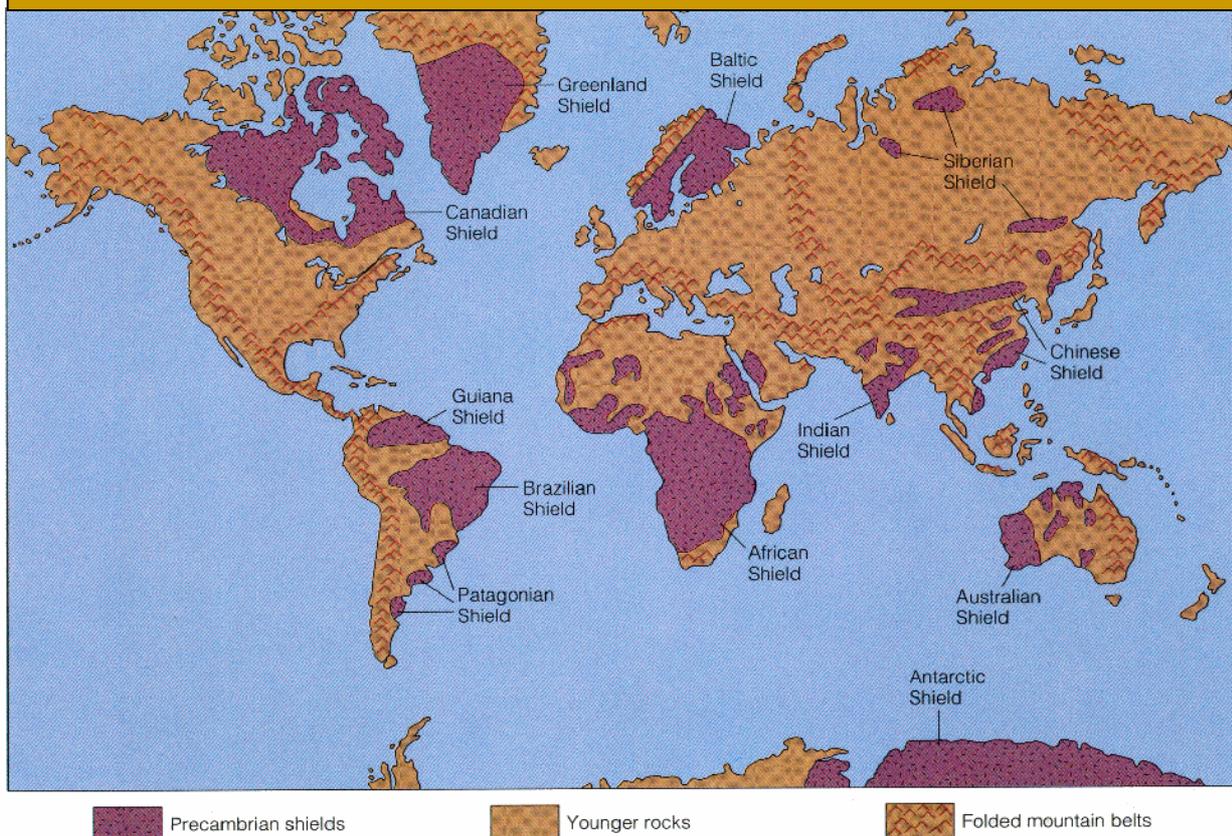


Fig. 2 : Les stromatolites



Constructions stromatolitiques actuelle en Australie

Stromatolites fossiles

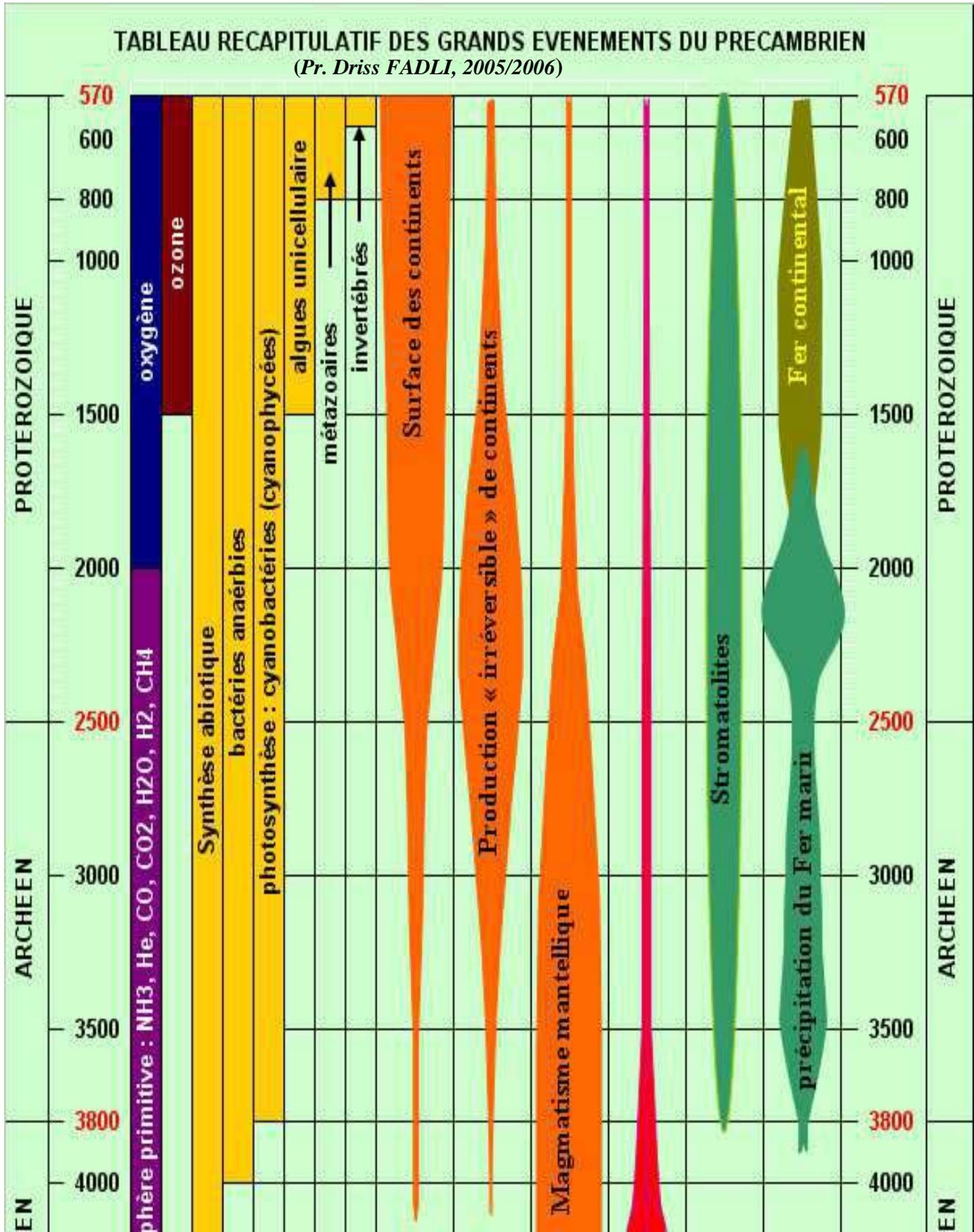


Fig. 3 : Supercontinent : le Rodinia

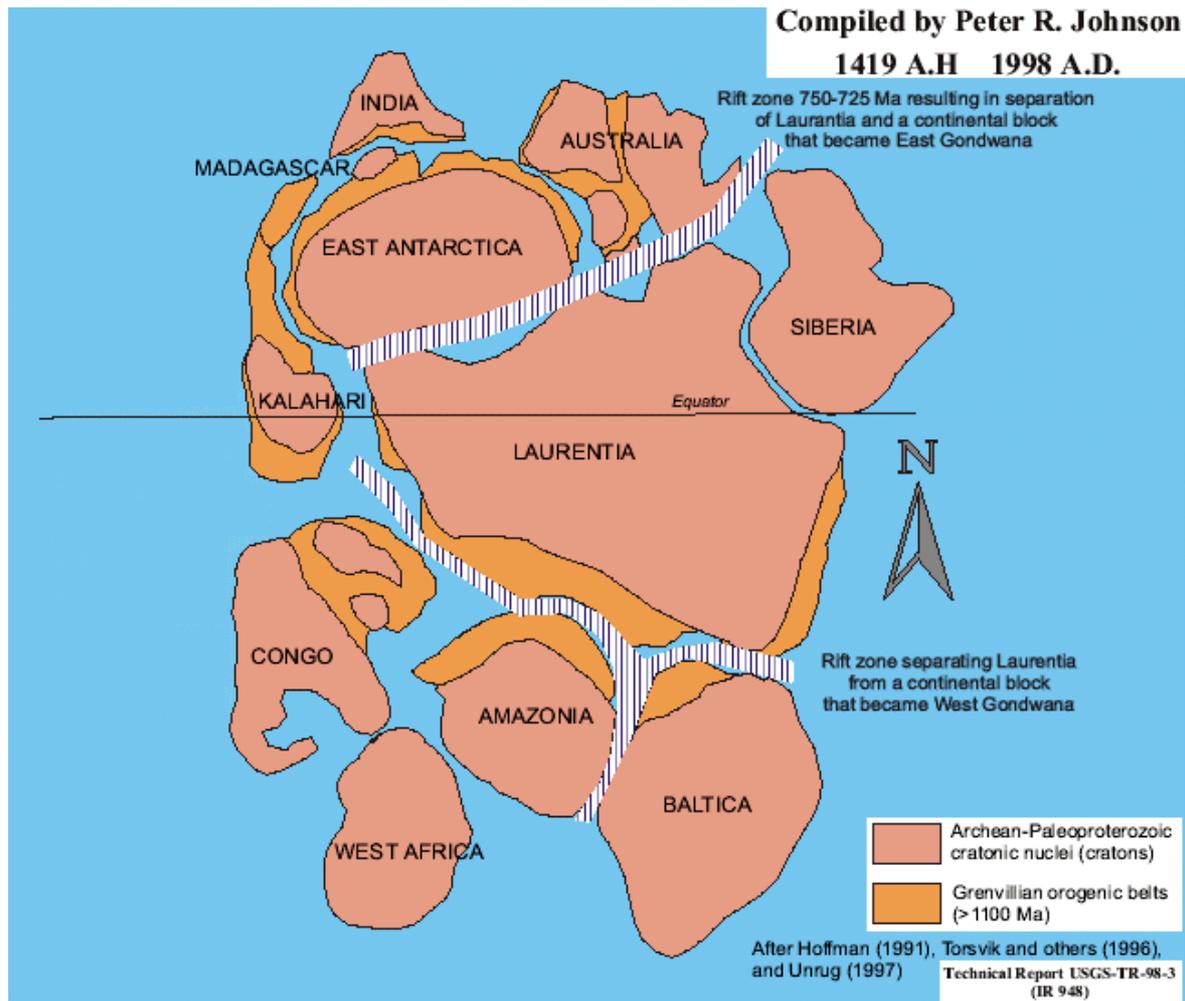


Fig. 4 : Faune d'Ediacara



Eléments de cours de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 8

HISTOIRE DE LA TERRE

DEUXIEME EPISODE : LE PHANEROZOIQUE

I - LE PALEOZOIQUE : - 541,1 Ma à – 252,1 ma (durée 289 Ma)

1- Le Cambrien: - 541,1 Ma à - 485,4 Ma (durée environ 55,7 Ma)

Les principaux groupes d'invertébrés représentés actuellement ont fait leur apparition dès cette époque. On parle d'*explosion cambrienne*. La plupart des espèces sont éteintes à la fin du Paléozoïque comme les *Trilobites* (fig.1) et à la fin du Cambrien comme les *Archaeocyathes* (éponges ayant joué un rôle constructeur de récifs) et la faune des Schistes de Burgess (Canada) telles que *Pikaia* (Chordé, ancêtre des vertébrés), *Anomalocaris* et *Opabinia*, grands prédateurs de l'époque (fig.2).

A cette époque le Rodinia commence à se fragmenter donnant naissance à un autre supercontinent : le Gondwana et à des à des microcontinents annexes: *Laurentia*, *Baltica*, *Sibéria*, *Kazakhstania*, *China* et à un océan appelé *Iapétus* (fig.2a). Ce dernier, une fois rempli de sédiments, commence à se fermer à la fin de cette époque: c'est le début du cycle orogénique calédonien qui va durer pendant l'Ordovicien et le Silurien.

2- L'Ordovicien: - 485,4 à – 443,4 ma (durée: 42 Ma)

Le milieu aérien est toujours un désert rocheux, tandis que la vie marine prospère au début de l'Ordovicien avec apparition de nouvelles espèces telles que les *Nautiloides* qui sont des Céphalopodes du genre *Orthoceras* (1), les Graptolites (micro-organismes coloniaux), les coraux Tabulés et Tétracoralliaires et les premiers vertébrés représentés par des poissons primitifs, dépourvus de mâchoires (Agnathes) avec un orifice buccal et sont recouverts de plaques osseuses dermiques.

A la fin de l'Ordovicien, presque un tiers de la faune marine s'est éteinte ; les trilobites furent particulièrement affectés. Cette disparition coïncide avec une sévère glaciation sévère de la planète. Les espèces qui ont résisté ont poursuivi leur évolution.

La fin de l'Ordovicien correspond à la progression de la fermeture de l'océan Iapetus et à la naissance d'un chaînon de micro continents et d'un nouvel océan: le *Rhéique*.

3- Le Silurien: - 443,4 à – 419,2 Ma (durée env.: 32 Ma)

Les premières plantes ayant conquis le milieu terrestre sont les bryophytes (plantes non vasculaires sans feuille, ni racine telles que les mousses et les hépatiques).

La vie terrestre est également marquée par l'apparition d'un nombre important de petits arthropodes terrestres (mille-pattes, araignées et acariens)

Dans le milieu marin, riche en récifs de coraux et en brachiopodes, les poissons placodermes agnathes se diversifient à côté des premiers poissons à mâchoires et des Euryptéridés, sortes de grands scorpions de mer dont la taille varie entre 40 cm et plus de 2m de long

4- Le Dévonien: âge des poissons- 419,2 à -358,9 Ma (durée env.: 60 Ma)

La vie marine prospère avec diversification et apparition de nouvelles espèces telles que les goniatites qui sont des céphalopodes (1), le premier tétrapode marin : *Acanthostega* (2) et les nombreuses espèces de poissons d'eau douce et salée où régnait des prédateurs géants dont *Duncleosteus* (3),

La vie terrestre est marquée par l'apparition des premiers vertébrés terrestres, les amphibiens comme l'*Ichtyostega* (4) et des premières forêts. Ces dernières sont constituées de Ptéridophytes

géantes, qui sont des plantes vasculaires sans graines (comme les fougères) dont *Archaeopteris* (5).

À la fin du Dévonien, on note l'extinction complète des graptolites. L'écosystème récifal a été fortement affecté et les récifs disparaissent pour ne revenir que beaucoup plus tard, au Trias, cette fois. Peu de trilobites survivent (une seule famille).

La fin du Dévonien est marqué par le rapprochement de la plaque du Gondwana avec la plaque Laurentia-Baltica qui supporte la chaîne calédonienne. Ce rapprochement va se poursuivre durant le Carbonifère et le Permien; c'est l'orogénèse hercynienne.

5- Le Carbonifère: apparition des reptiles - 358,9 à – 298,9 Ma (durée: 60 Ma)

Le climat est chaud et très humide en Europe et en Amérique du Nord, avec des marécages tropicaux, tandis que l'hémisphère sud connaissait de nombreuses périodes glaciaires.

Les gisements houillers de l'hémisphère nord qu'on connaît actuellement résultent de la fossilisation des forêts installées dans ces zones tropicales. La végétation est constituée par l'abondance et la diversification des espèces dévoniennes en particuliers les Ptéridophytes (fougères et prêles géantes) et par l'apparition de nouvelles espèces végétales appartenant à la catégorie Spermaphytes qui sont des plantes à graines (cycadales et conifères). Parmi les espèces ayant dominé ces forêts on cite les *Lepidodendron* (a), *Sigillaria* (b), *Cordaites* (c), *Calamites* (d), des arbres-fougère, des "fougères à graine", *cycas revoluta*, *Ginkga biloba* actuels.

Dans ces forêts apparaissent les premiers reptiles de petite taille, tandis que les amphibiens et les insectes se diversifient (libellules primitives géantes).

Dans le milieu marin on note un important développement des Coraux, Brachiopodes, Poissons et des fusulines

La fin du Carbonifère est marquée par une importante glaciation qui se poursuit jusqu'au Permien inférieur

Du point de vue géodynamique, la fermeture de l'océan Rhéique est presque achevée, entraînant le rapprochement de la plaque du Gondwana avec la plaque Laurentia-Baltica. C'est le début de la formation de la chaîne de montagne hercynienne au Maroc et en Europe

6- Le Permien: -298,9 à - 252 Ma (durée env.: 41 Ma)

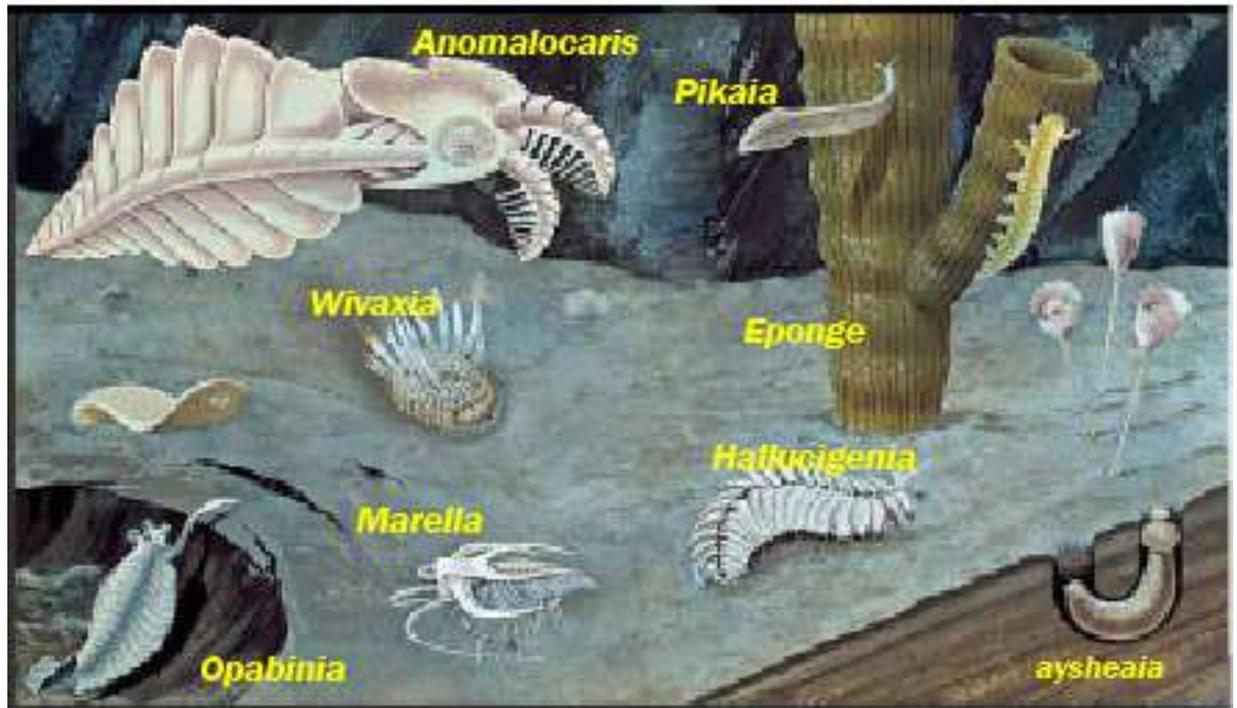
Sur les continents les Ptéridophytes qui étaient développées au Carbonifère régressent considérablement alors que les Gymnospermes comme les cycadales et les conifères (*Walchia*, *Woltzia*, *Ginkgoales*). Dans cet environnement apparaissent des insectes assez semblables aux groupes actuels, les premières tortues et des reptiles (plus développés par rapport au Carbonifère), avec une espèce mammalienne le *Domitrodon* (1).

Dans le milieu marin apparaissent des reptiles aquatiques qui connaîtront leur apogée au Mésozoïque.

La fin du Permien enregistre une crise majeure marquée par l'extinction de 80% des espèces dont les Trilobites, les Échinodermes (Blastoïdes) ou les Cœlentérés (Tabulés) les Goniatites.

La fin du Permien est marquée par l'assemblage du supercontinent Pangée et par un réchauffement général et une période d'assèchement climatique qui se poursuit au Trias

La Pangée résulte de la jonction entre le Gondwana et la plaque Laurentia-Baltica en formant une mégasuture orogénique hercynienne. Cette dernière correspond à l'emplacement des chaînes de montagnes orogéniques de l'Oural et des Appalaches qui s'étendent depuis l'Amérique par les Mauritanides, en passant par l'Europe et le Maroc







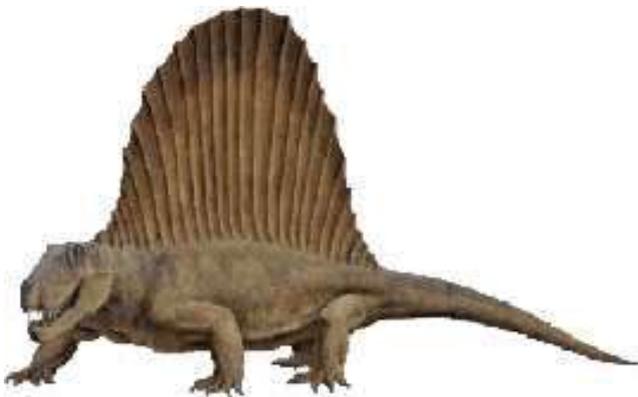
Calamites

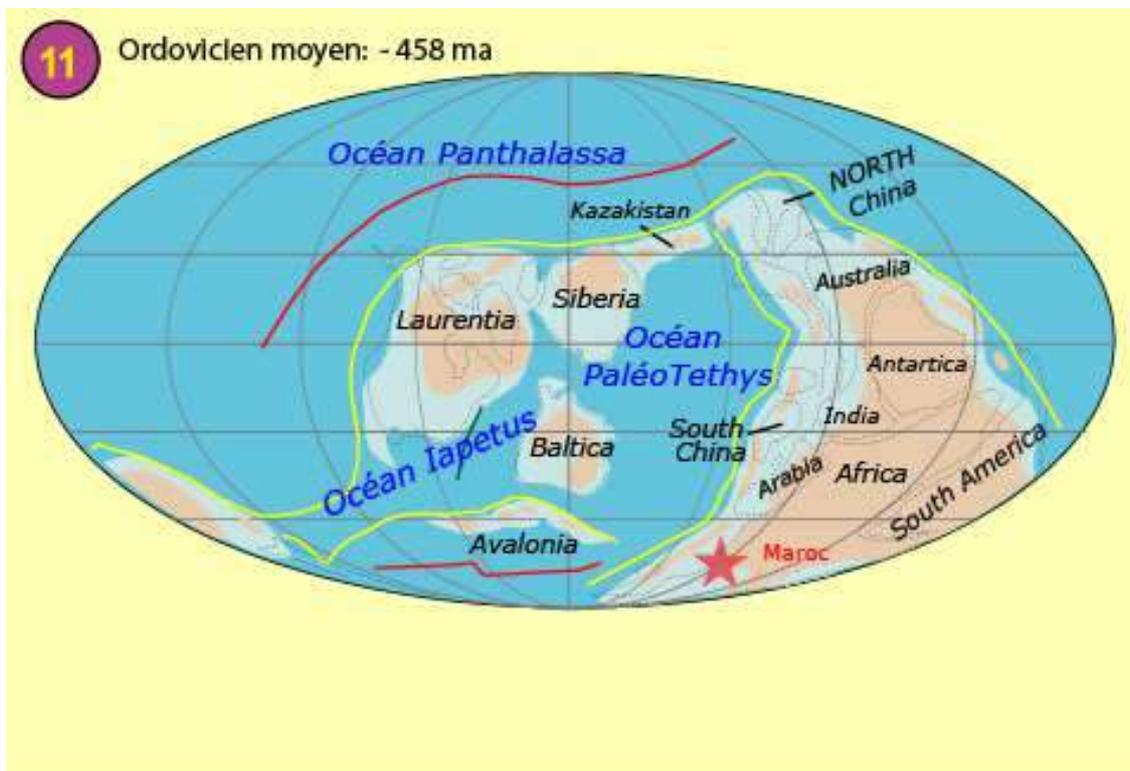
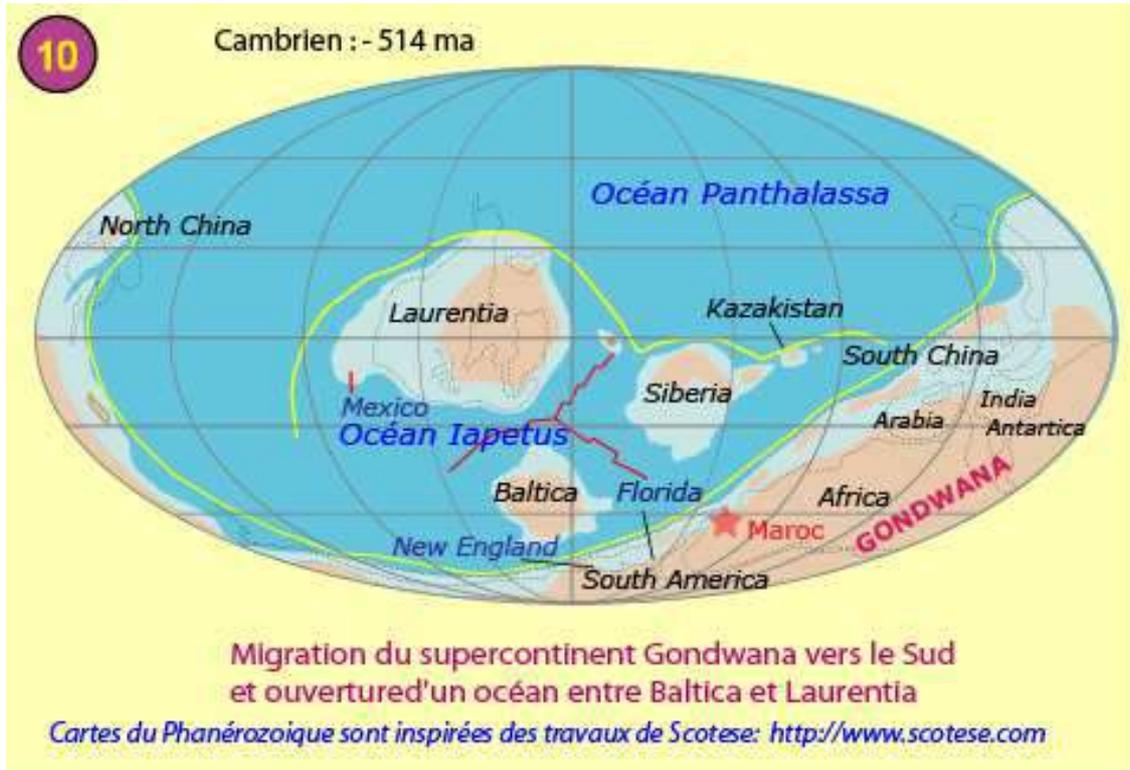


Lepidodendron



Neuropteris





13

Silurien moyen - 425 ma



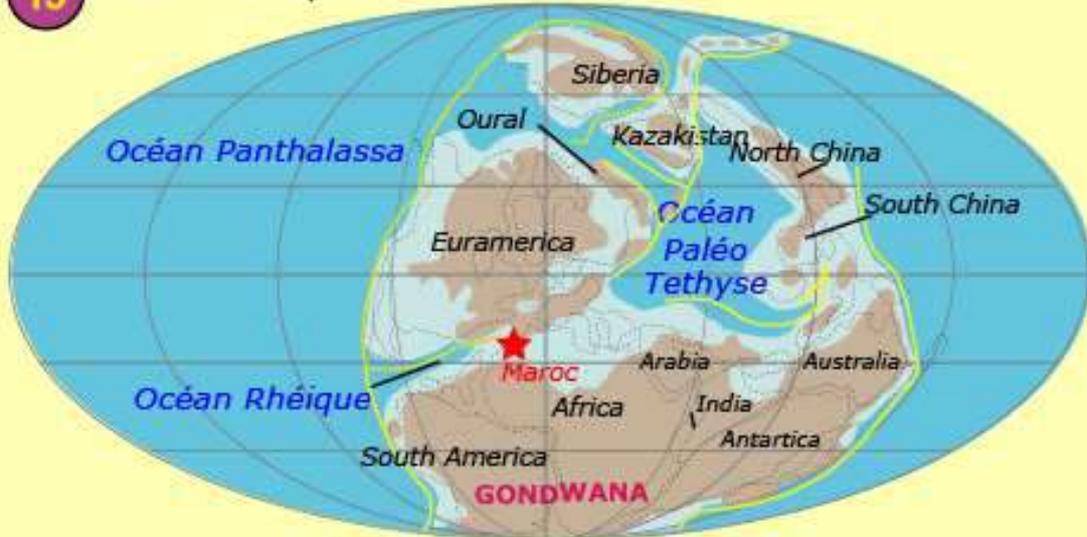
14

Dévonien moyen - 390 ma



15

Carbonifère sup. -365 ma



16

Permien - 255 ma



I - LE MESOZOIQUE ET LE CENOZOIQUE

Voir le poster intitulé : « Les principaux visages de la Terre depuis sa création » qui sera brièvement commenté pendant la séance du cours

Bon courage



LIENS UTILES 🙌

Visiter :

1. <https://biologie-maroc.com>

- Télécharger des cours, TD, TP et examens résolus (PDF Gratuit)

2. <https://biologie-maroc.com/shop/>

- Acheter des cahiers personnalisés + Lexiques et notions.
- Trouver des cadeaux et accessoires pour biologistes et géologues.
- Trouver des bourses et des écoles privées

3. <https://biologie-maroc.com/emploi/>

- Télécharger des exemples des CV, lettres de motivation, demandes de ...
- Trouver des offres d'emploi et de stage

