



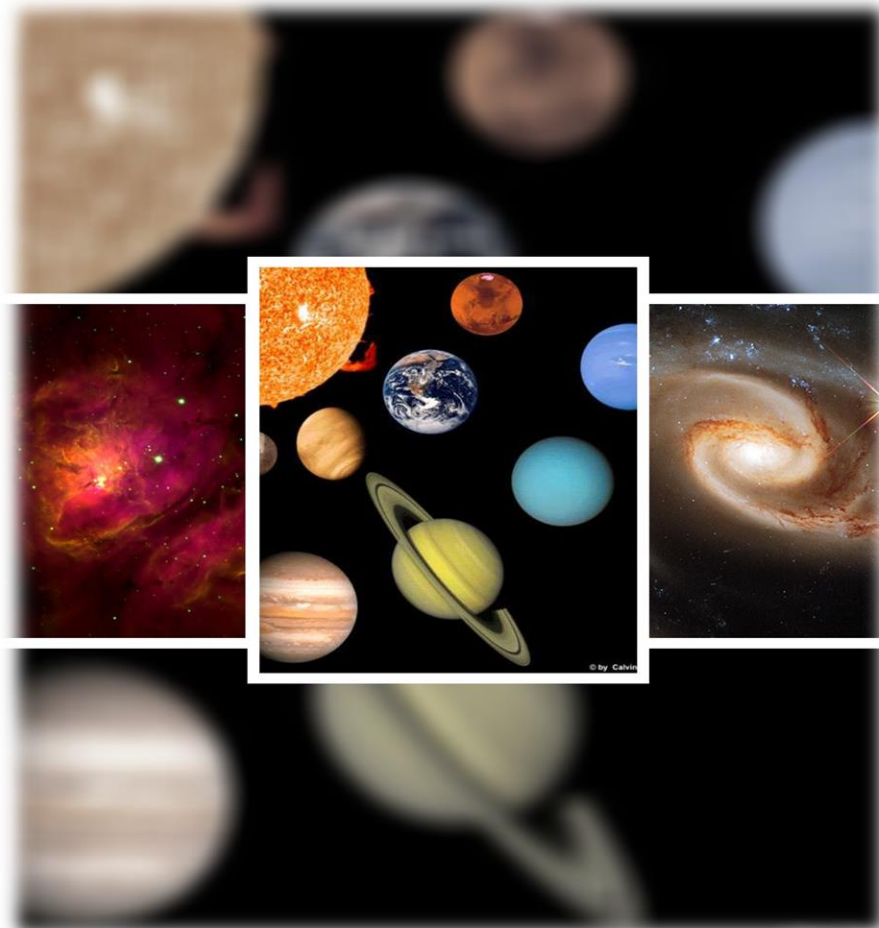
Université Sultan Moulay Slimane
Faculté Polydisciplinaire
Béni-Mellal



Cours du Module de Géologie

Filière SVI-S1

GEOLOGIE GENERALE



Pr. Samira KRIMISSA

Faculté Polydisciplinair

2020/2021

Chapitre I

La cosmologie

Introduction générale

La cosmologie se consacre à l'étude la plus globale qui soit, celle de l'Univers, du cosmos. L'objet de son étude, le concept d'univers, ou du cosmos, recouvre davantage qu'un simple rassemblement d'objets. Il implique l'existence de propriétés, de relations que l'on ne peut attribuer à tel ou tel objet en particulier mais qui sont globales, universelles précisément. Ainsi, le cosmologue ne s'intéresse pas spécifiquement aux différents astres qui peuplent l'Univers : planètes, étoiles ou galaxies, mais à leurs relations mutuelles, au cadre général dans lequel ils évoluent, aux lois communes auxquelles ils obéissent, à la structure qui les abrite, tout ceci constituant précisément les propriétés globales du cosmos, considéré comme une globalité. Les divers phénomènes célestes ne le concernent que pour autant qu'ils manifestent une propriété cosmique: ainsi se fait le lien avec l'astrophysique et l'astronomie.

L'examen de la distribution des galaxies, par exemple, concerne le cosmologue à plusieurs titres. D'une part, les processus dynamiques tels que la formation des galaxies et la structuration de la matière qui ont produit cette distribution font partie de l'histoire cosmique. D'autre part, les galaxies jouent le rôle de jalons qui dévoilent la structure géométrique de l'Univers lui-même. L'analyse de cette structure requiert l'examen des galaxies, ne serait-ce que pour mesurer leurs éloignements. Le cosmologue ne peut donc éviter d'être aussi astronome et astrophysicien. Le terme de cosmologie s'est généralisé et recouvre ce qui autrefois apparaissait sous les dénominations distinctes de cosmographie et de cosmogonie. La cosmographie est donc sans doute la branche la plus «dépouillée» de toute l'astrophysique,

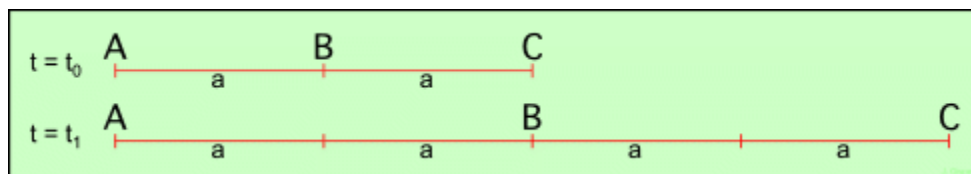
elle étudie la structure géométrique globale de l'espace-temps (courbure et topologie, homogénéité et isotropie, extension finie ou infinie) indépendamment de son contenu.

I. Histoire de l'univers

L'Homme a toujours eu la préoccupation de comprendre son environnement dans son ensemble, sans en avoir les moyens. Sur le plan observationnel, l'œil nu est limité à quelques centaines d'années-lumière, c'est-à-dire à la proche banlieue du Soleil (à peine un dix-millionième de l'Univers observable en distance ; l'Univers observable est l'ensemble de ce que l'on peut voir aujourd'hui, il est défini plus loin. En volume, ce n'est plus que la fraction 10^{-21} de ce qui existe...).

Au début de XXe siècle, **les physiciens ont compris que "l'univers a une histoire", qu'il est "en expansion", selon leur expression.** Hubble (1923) découvrait que toutes les galaxies dont ils prenaient les spectres (spectroscope: appareil servant à étudier et à décomposer les spectres de la lumière), présentaient un décalage de leurs raies spectrales vers le rouge.

L'univers est donc en expansion, et les distances entre les galaxies s'accroissent parce que l'Univers grossit. Le décalage vers le rouge des systèmes de raies indiquaient que certaines galaxies s'éloignaient de nous - de la Voie Lactée - à plus de 1800 km/s. Cette découverte est souvent présentée comme la plus importante du XXe siècle.



- (Une année-lumière = la distance parcourue par la lumière en une année = 9 460 milliards de km avec une vitesse de 300 000 km/s).
- Principe de Doppler : tout comme le son, la lumière subit une variation des radiations comme suit « quand un objet lumineux s'éloigne de nous sa lumière devient plus grave, elle est décalé vers le rouge et perd de l'énergie et quand l'objet vient vers nous sa lumière devient plus aigue,

elle est décalé vers le bleu et acquiert de l'énergie le changement de la couleur est d'autant plus grand que la vitesse augmente.

I.1. Expansion de l'univers (figure1).

C'est l'espace-temps qui est dynamique. C'est la distance qui les sépare qui augmente au cours du temps. Et c'est ce phénomène-là qu'on va appeler **l'expansion de l'univers**.

L'univers s'étend éternellement dans le futur comme dans le passé.

Georges Lemaître a déduit les conséquences passées de l'expansion : en regardant le film à l'envers, on voit l'Univers se contracter jusqu'à une densité très grande. Il en a déduit que l'Univers avait dû se trouver dans un état d'extrême condensation, qu'en vertu des idées de l'époque sur la radioactivité, il a nommé atome primitif. Cette notion n'est autre que **le Big Bang**, sauf le nom. L'essentiel est l'existence d'un instant initial.

Ce qui implique qu'à un certain moment, cet univers était concentré en un seul et même point. Les calculs faits par la suite ont démontré que ce point unique, qui abritait toute la matière alors présente dans l'Univers, devait avoir un volume nul et une densité infinie. L'univers est donc le résultat de l'explosion de ce point unique au volume nul. Cette grande explosion, qui a permis la naissance de l'Univers, de même que la théorie décrivant ce phénomène, a été appelée le "Big Bang". Découvert par Géorge Le MAITRE en 1931.

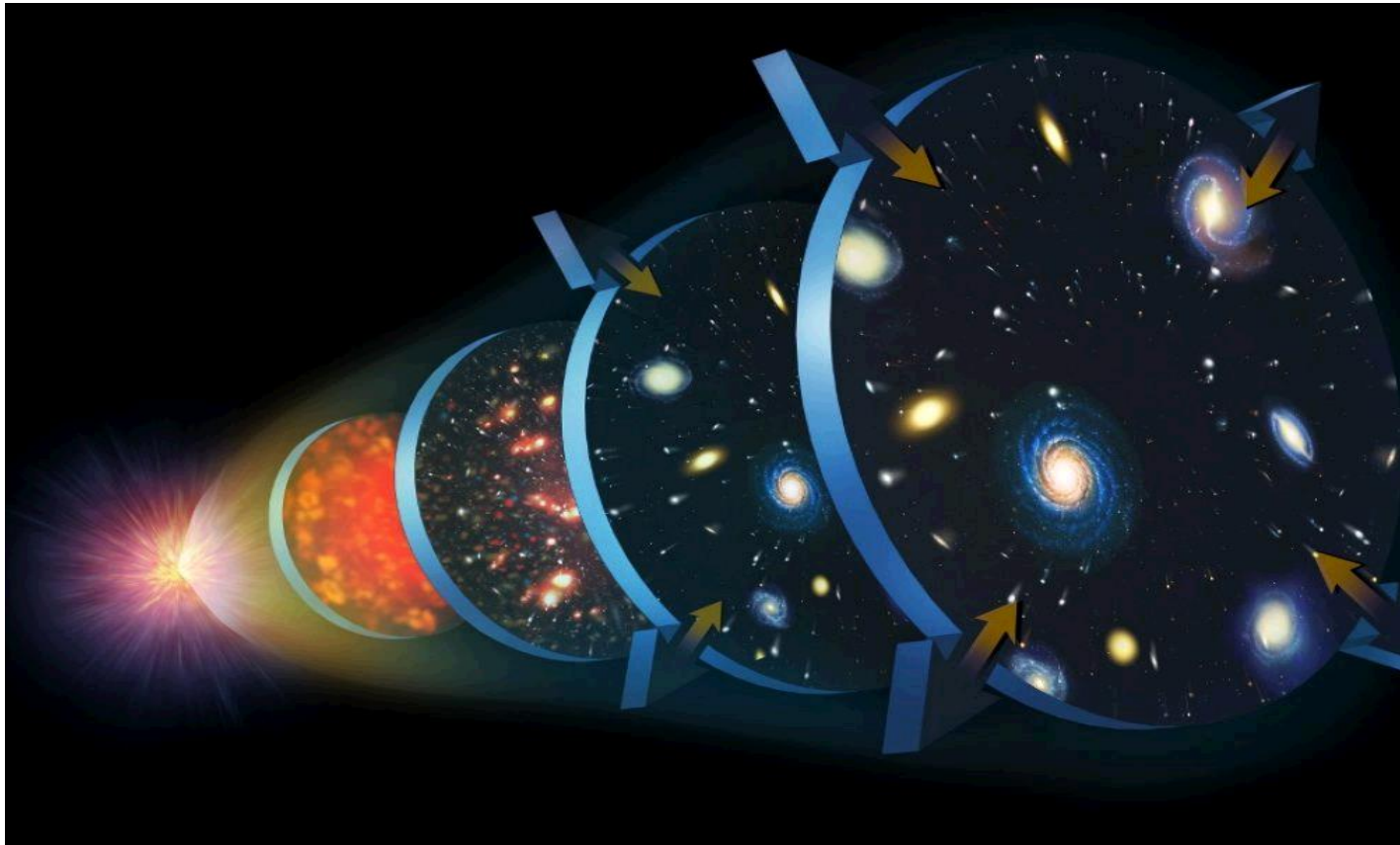


Figure 1 : illustration schématique de l'expansion de l'univers

I.2. Le Big Bang

Le **Big Bang** « Grand Boum » est un modèle cosmologique utilisé par les scientifiques pour décrire l'origine et l'évolution de l'Univers. De façon générale, le terme « Big Bang » est associé à toutes les théories qui décrivent notre Univers comme issu d'une dilatation rapide. Par extension, il est également associé à cette époque dense et chaude qu'a connue l'Univers il y a 13,8 milliards d'années.

I.2.1. Les arguments en faveur du Big Bang

Deux preuves observationnelles décisives ont donné raison aux modèles de Big Bang : il s'agit de la détection du fond diffus cosmologique, rayonnement de basse énergie (domaine micro-onde) vestige de l'époque chaude de l'histoire de l'univers, et la mesure de l'abondance des éléments légers, c'est-à-dire des abondances relatives de différents isotopes de l'hydrogène, de l'hélium et du lithium qui se sont formés pendant la phase chaude primordiale.

Ces deux observations remontent au début de la seconde moitié du XX^e siècle, et ont assis le Big Bang comme le modèle décrivant l'univers observable. Outre la cohérence quasi parfaite du modèle avec tout un autre ensemble d'observations cosmologiques effectuées depuis, d'autres preuves relativement directes sont venues s'ajouter : l'observation de l'évolution des populations galactiques, et la mesure du refroidissement du fond diffus cosmologique depuis plusieurs milliards d'années.

En effet, le concept général du Big Bang, à savoir que l'Univers est en expansion et a été plus dense et plus chaud par le passé, doit sans doute être attribué au Russe Alexandre Friedmann, qui l'avait proposé en 1922, cinq ans avant Lemaître. Son assise ne fut cependant établie qu'en 1965 avec la découverte du fond diffus cosmologique, l'« éclat disparu de la formation des mondes », selon les termes de Georges Lemaître, qui attesta de façon définitive la réalité de l'époque dense et chaude de l'Univers primordial. Albert Einstein, en mettant au point la relativité générale, aurait pu déduire l'expansion de l'Univers, mais a préféré modifier ses équations en y ajoutant sa constante cosmologique, car il était persuadé que l'Univers devait être statique.

II. Composition de l'univers

L'univers actuel, froid et vaste se compose de différents éléments. Premièrement, notre univers est composé d'une infinité de galaxies et de vide ou matière noire laissant perplexes la plupart des scientifiques.

Une galaxie est une structure cosmique formée par le rassemblement sous l'effet de la gravitation, d'étoiles et de leurs planètes éventuelles, de gaz, de poussière interstellaire, peut-être essentiellement de matière noire, et contenant souvent un trou noir super massif en son centre.

Il ya 3 types de galaxies:

- Les galaxies spirales (photo 1), 25 % des galaxies de l'univers, sont entourées d'un halo galactique formé de gaz et de poussières dans lequel on trouve des étoiles isolées et des amas globulaires.

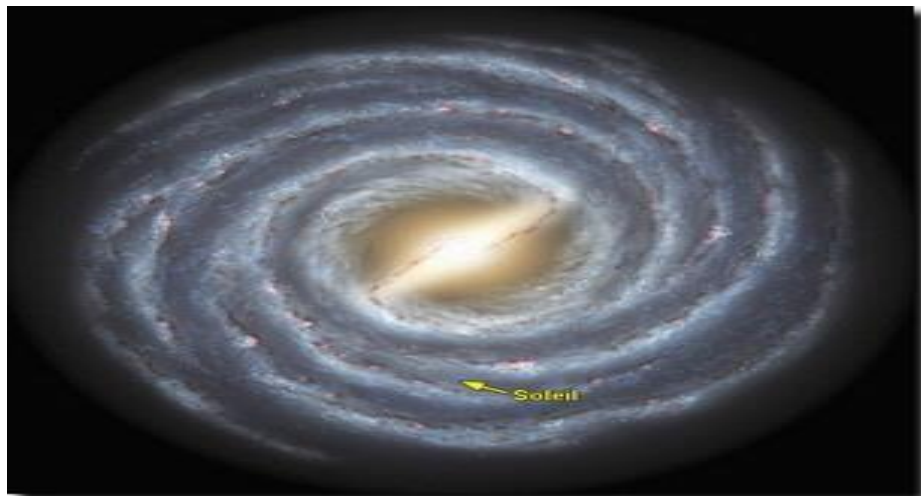


Photo 1: galaxie spirale

(<https://www.nationalgeographic.fr/photography/2019/09/12>)

- Les galaxies elliptiques (photo 2) (65 % des galaxies) qui n'ont pas de structures évidentes, à part leur symétrie elliptique ou sphérique. Elles sont composées en majorité d'étoiles âgées et sont le siège d'émissions radios importantes d'où leur nom de radiogalaxies.

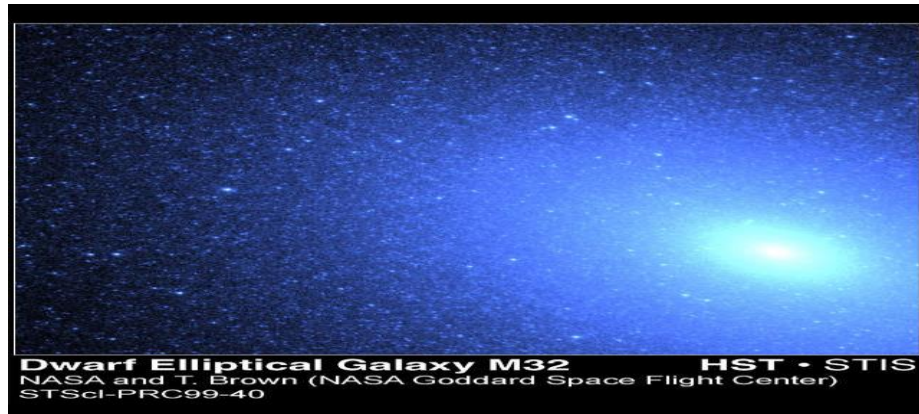


Photo 2: galaxie elliptique

(<https://www.nationalgeographic.fr/photography/2019/09/12>)

- Les galaxies irrégulières (photo 3), qui n'entrent pas dans ces 2 types principaux, ne représentent que 10 % des galaxies, elles sont riches en matières interstellaires et pauvres en éléments lourds.



Photo 3 : galaxie irrégulière

(<https://www.nationalgeographic.fr/photography/2019/09/12>)

Les galaxies ne sont que rarement solitaires dans l'Univers : du fait de la gravité, elles ont tendance à se regrouper, formant ce qu'on appelle des groupes et des amas de galaxies. Il arrive que certaines se rapprochent jusqu'à se « percuter ». En fait, il faut garder à l'esprit que dans une galaxie, les étoiles sont très distantes les unes des autres : cela signifie que lors d'une fusion de galaxies, il n'y a quasiment pas de collisions d'étoiles — les deux galaxies s'interpénètrent.



Photo 4 : Fusion de deux galaxies spirales

(<https://www.nationalgeographic.fr/photography/2019/09/12>)

Plus les galaxies évoluent, plus la matière interstellaire est consommée par les étoiles qui rejettent à leur mort des éléments lourds. Ainsi les galaxies irrégulières seraient peu évoluées contrairement aux galaxies elliptiques. **Cela ne veut toutefois pas dire qu'elles sont plus jeunes.**

II. 1. La Voie Lactée

C'est une galaxie spirale (photo 5), comme 25 % des galaxies de l'univers. Les galaxies spirales sont entourées d'un halo galactique formé de gaz et de poussières dans lequel on trouve des étoiles isolées et des amas globulaires.

La Voie lactée appartient à un groupe de galaxies groupe de galaxies simplement appelé Groupe Local, qui comprend deux grandes galaxies (la Voie lactée et M31, la galaxie de l'Andromède), quelques objets intermédiaires et plus de 25 galaxies naines. Le Groupe local est organisé suivant deux sous-groupes, chacun centré sur la Voie lactée et M31 respectivement.



Photo 5 : la voie lactée

(<https://www.nationalgeographic.fr/photography/2019/09/12>)

La galaxie d'Andromède est la grande galaxie la plus proche de notre galaxie, à environ 2,9 millions d'années de lumière mais il y a beaucoup de petites galaxies très proches. (25 galaxies naines du Groupe local sont des satellites ou des compagnons de la Voie lactée.

A. Le système solaire

Le système solaire est un système planétaire composé d'une étoile, le soleil et de corps célestes gravitant autour de lui (huit planètes et leurs 175 satellites naturelles connus «les lunes», 5 planètes naines et des milliards de petits corps glacés «comètes»).

Les planètes internes (figure 2) proches du Soleil (Mercure, la Terre, Mars, Vénus...) sont dites telluriques car elles sont composées de matière rocheuse, agglomérats de poussières cosmiques, de glace et de matière lourde expulsée par le Soleil. Tout cela toujours sous l'effet de la gravitation.

Une **planète tellurique**, en opposition aux planètes gazeuses, est une planète composée de roches et de métaux qui possède en général trois enveloppes concentriques (noyau, manteau et croûte). Sa surface est solide et elle est composée principalement d'éléments non volatils. Les planètes telluriques sont beaucoup plus petites que les planètes gazeuses mais ont une densité beaucoup plus élevée car elles sont composées de fer et de silicates.

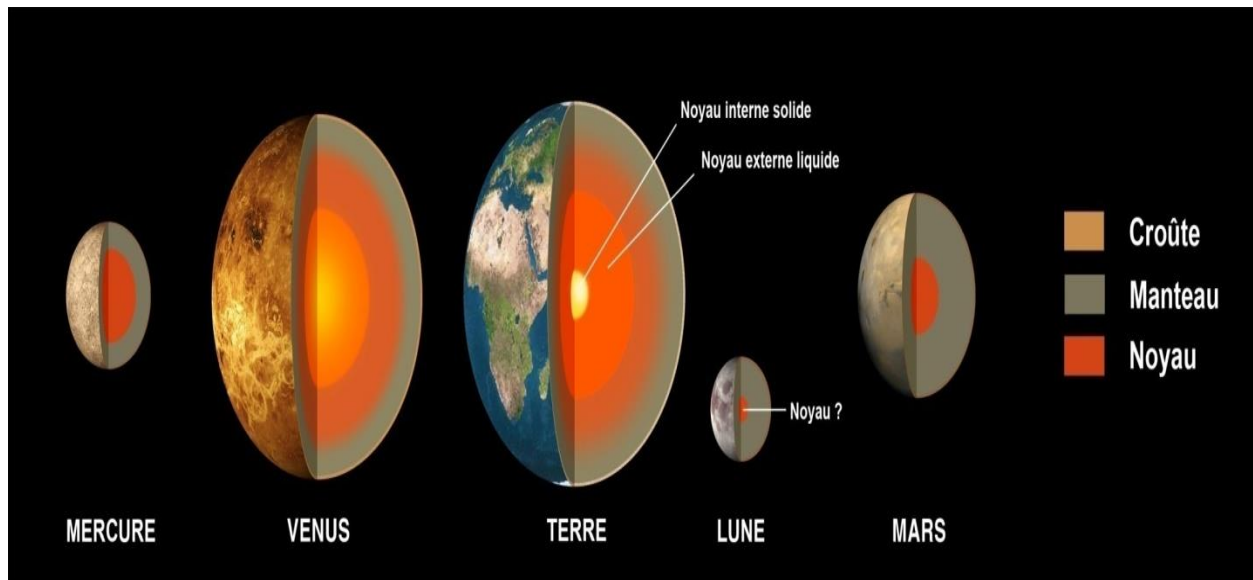


Figure 2 : Présentation des planètes telluriques

- **Mercury** : complètement métallique; Aucune atmosphère différenciée. Cratères et Mers (plaines); Noyau liquide.
- **Venus** : Pas de champ magnétique; Atmosphère très chaude et croûte ductile.
- **Mars** : Pas de champ magnétique; Atmosphère très mince et croûte ductile.
- Et la **Terre**.

Les planètes externes

Les planètes gazeuses (figure3) sont plus éloignées du Soleil dans le Système solaire et possèdent un nombre important de satellites. Elles possèdent aussi toutes des anneaux planétaires.

- Géantes (**Jupiter & Saturne...**) sont principalement formées de gaz qui n'ont pas atteint la masse suffisante pour devenir une étoile.
- Petites planètes bleues (**Uranus & Neptune**) Champ magnétique incliné.

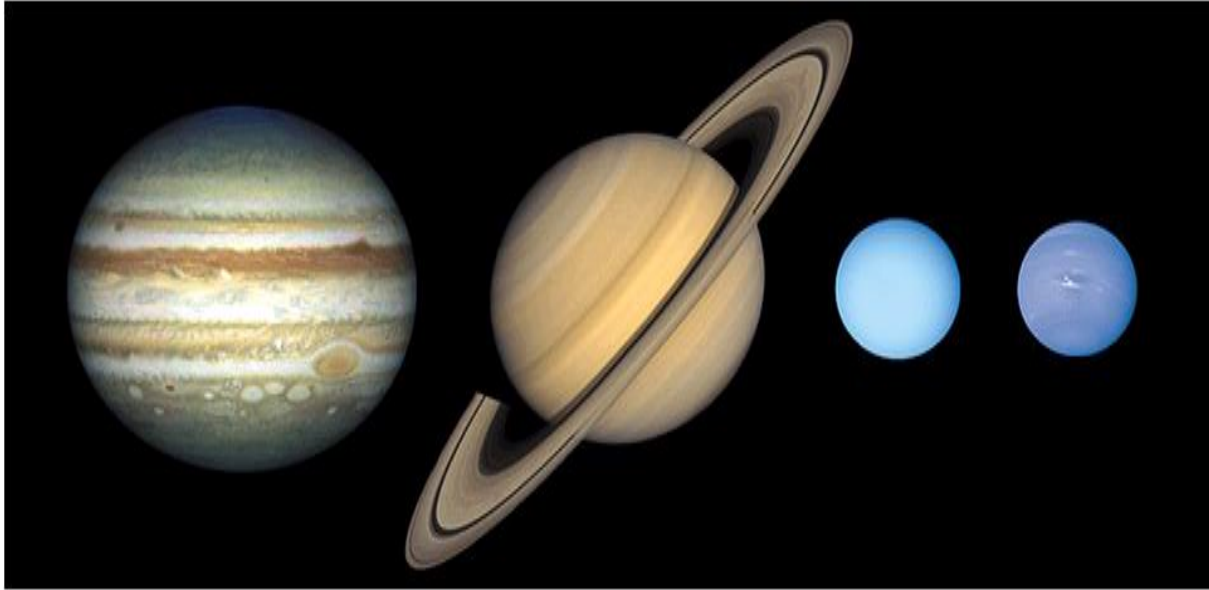


Figure 3 : les planètes gazeuses

III. La planète Terre

III.1. Origine de la terre

Il y a 5 milliards d'années, la Terre n'existait pas. A la périphérie de notre galaxie, la voie lactée, il n'y avait qu'un vaste nuage de gaz et de poussières. A l'origine de ce nuage : l'explosion d'une supernova.

Ce nuage de poussière est appelé nuage moléculaire. Ce nuage est immense, plusieurs centaines d'années lumière (quelques milliards de km) de diamètre. Il est formé de débris d'étoiles ayant appartenu à un univers primitif, étoiles qui auraient explosé après avoir consommé toute leur énergie. Lors de l'explosion, les particules (dont des éléments lourds (fer, nickel, aluminium, silicone...)) qui constituaient ces étoiles ont été vaporisées à travers toute la galaxie. Puis, sous l'effet d'une force, la gravité, ces particules se sont rassemblées pour former des étoiles et des planètes.

Sous l'effet des forces gravitationnelles, les particules du nuage moléculaire se sont agglomérées, puis, pendant une dizaine de millions d'années, le nuage s'est comprimé lentement sous l'effet de sa propre gravité. Cette compression a provoqué l'accroissement de la vitesse de rotation du nuage. L'énergie dégagée par l'apport de matière a réchauffé le centre du nuage.

Cette boule en rotation est devenue notre Soleil (1,4 millions de km de diamètre) !



Photo 6 : la nébuleuse solaire

(<https://www.nationalgeographic.fr/photography/2019/09/12>)

Le reste du nuage, la nébuleuse solaire, s'est étiré pour former un disque de matière. L'accrétion des particules a permis la formation d'objets plus gros : les planétésimaux (quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre). La naissance du système solaire aurait duré 10 à 15 millions d'années.

Grâce à quel processus des poussières se sont-elles transformées en planète ?

En mars 2003, une expérience informelle réalisée par l'astronaute Donald Pettit dans la station spatiale internationale, a permis de comprendre ce processus. Cet astronaute s'amusa

à observer des sachets contenant du sel en apesanteur. L'intérêt de l'observation de D. Pettit fut révélé par un autre astronaute : Stanley Love.



Photo 7 : Particules de sel en apesanteur

En apesanteur, lorsque deux cristaux de sel entrent en collision, cela crée une charge électrostatique qui les force à s'agglomérer. Si on secoue le sac plastique contenant l'amas, il se désagrège mais dès que l'on arrête, l'amas se reforme.

Cette première phase d'existence de la Terre (amas de poussières) aurait eu lieu il y a 4,5 milliards d'années. Lorsque cet amas atteint une taille suffisante (800 mètres de diamètre), sa masse est si importante qu'il aspire la poussière présente dans le disque environnant.

Pendant environ trois millions d'années, dans le système solaire interne, ces amas vont se regrouper pour former une vingtaine de protoplanètes.

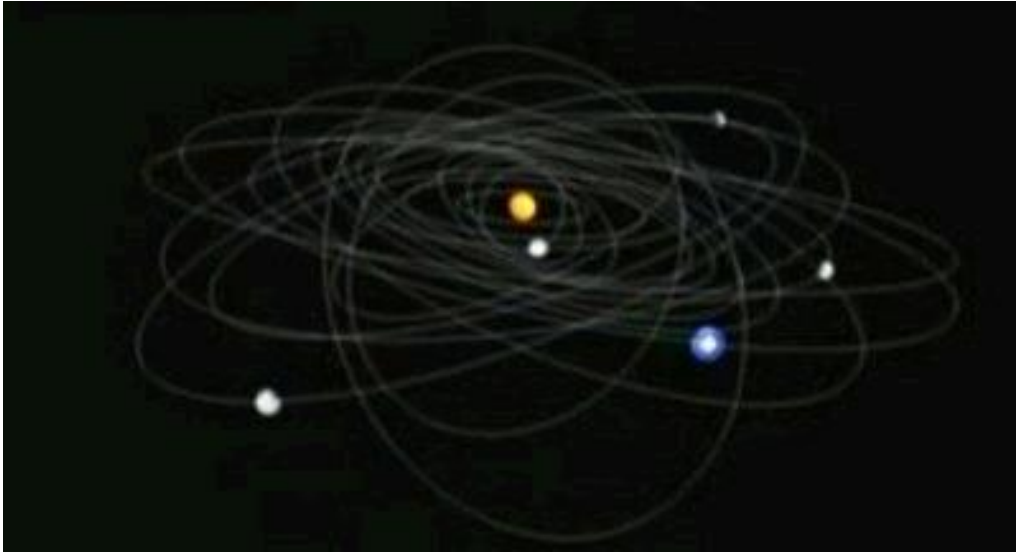


Figure 4 : organisation du système solaire

Puis les protoplanètes entrent en collision et fusionnent pour donner quelques planètes dont Vénus, Mercure, Mars et la Terre. Notre Terre se serait formée sur une période d'environ 30 millions d'années ; ce qui restait du nuage a donné la ceinture d'astéroïdes dont provient l'essentiel des météorites. Les chocs aléatoires ont conduit à la formation de corps plus gros que ceux déjà formés ou à leur désintégration.

La température de cette Terre primitive est d'environ 4700°C (chaleur due aux collisions). Cette Terre est donc formée de matière en fusion. Petit à petit, la Terre se refroidit, les éléments les plus légers remontant vers la surface et les plus lourds (fer) s'enfonçant pour former un noyau. La solidification du noyau interne de la Terre aurait commencé il y a 3,5 milliards d'années.

Le matériau terrestre initial est constitué de fer à plus de 85% sous forme métallique réduite, et à moins de 15% sous forme métallique oxydée (ces proportions ont été obtenues à partir de l'analyse des chondrites).

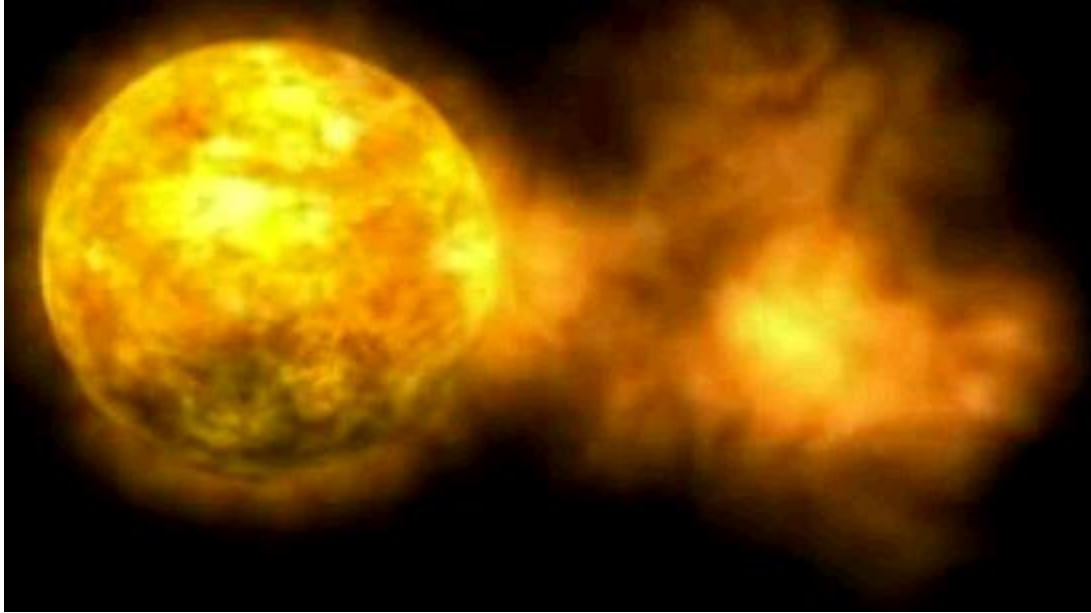


Photo 8 :

(<https://www.nationalgeographic.fr/photography/2019/09/12>)

La Terre s'est donc refroidie jusqu'à atteindre une température de 1100°C.

III.2. Origine de la lune

Alors que la Terre a environ 50 millions d'années, elle va entrer en collision avec une autre protoplanète (de la taille de Mars). Cette collision sera telle que la Terre ne va "fondre" complètement. Cette collision serait à l'origine de "l'éjection de la Lune". La Lune se serait formée par agglomération des résidus de roche vaporisés lors de l'impact.

Au départ, la Lune était beaucoup plus proche de la Terre qu'actuellement, sa présence a engendré les marées.

La collision a probablement modifié l'axe de rotation de la Terre, cette inclinaison est à l'origine des saisons.

L'impact qui a donné naissance à la Lune aurait aussi déterminé la différenciation de la Terre et son organisation en plusieurs couches. Les deux objets qui sont entrés en collision avaient déjà

chacun un noyau. Lors du choc les deux noyaux auraient fusionné et donné un seul noyau. A la suite de l'impact, la surface de la Terre serait restée en fusion pendant des milliers d'années, formant un "océan magmatique" d'au moins 1 000km de profondeur. La fusion des silicates a produit un magma appauvri en silicium. Les solides résiduels silicatés, plus denses, ont constitué le manteau inférieur. L'alliage fer/nickel liquide, encore plus dense, a migré vers le centre, réduisant sur son passage une partie des silicates en silicium, incorporant ce silicium ainsi que de l'oxygène. Cette migration (en moins d'un million d'années) a entraîné tous les éléments ayant une forte affinité pour le fer tels que le platine, l'or, l'iridium, le tungstène...

III.3. Origine de l'atmosphère

Lors de la fusion du manteau supérieur, la quasi totalité des gaz se sont échappés, contribuant à la formation de l'atmosphère.

A l'issue de cette différenciation primitive, il y a 4535 millions d'années, la Terre était donc constituée d'un noyau liquide d'environ 3400 km de diamètre, d'un manteau inférieur (1900 km d'épaisseur) et d'un manteau supérieur (océan magmatique d'environ 1000 km d'épaisseur).

Cette Terre primitive a failli disparaître à cause d'une tempête solaire. Mais son noyau, par un effet dynamo, a protégé la Terre en créant un bouclier magnétique : la magnétosphère. Sans son noyau, la Terre ne pourrait pas conserver une atmosphère. Cette atmosphère primitive contenait sûrement des gaz rares (néon, argon, krypton...), peu d'hélium, du dioxyde de carbone et de l'azote.

A ce stade de son histoire, la Terre ne possède toujours pas de croûte ni d'eau. En effet le système solaire interne est encore beaucoup trop chaud pour que l'eau puisse exister à l'état liquide. D'une part les matériaux constituant la Terre primitive ne contenaient pas assez d'Hydrogène pour que son oxydation puisse former de l'eau, et d'autre part l'hydrogène terrestre n'a pas la bonne signature isotopique (peu ou pas de deutérium).

La composition de cette atmosphère primitive est supposée proche de celle des gaz volcaniques actuels et des chondrites (météorites indifférenciées), (voir Tableau 1). Elle est donc très riche en vapeur d'eau et dioxyde de carbone. On note l'absence de dioxygène.

	H₂O	CO₂	N₂	O₂
Gaz volcaniques actuels	83 %	12 %	5 %	0 %
Gaz des chondrites	80 %	15 %	5 %	0 %

La surface de la Terre se refroidit progressivement. La vapeur d'eau atmosphérique se condense et précipite à la surface de la planète. Les océans se forment. La composition de l'atmosphère est alors modifiée : elle présente une forte concentration en dioxyde de carbone. Une partie importante de ce dioxyde de carbone se retrouve dissous dans l'eau des océans. Le taux de dioxyde de carbone devait être alors de 60 à 70 %. C'est l'atmosphère primitive.

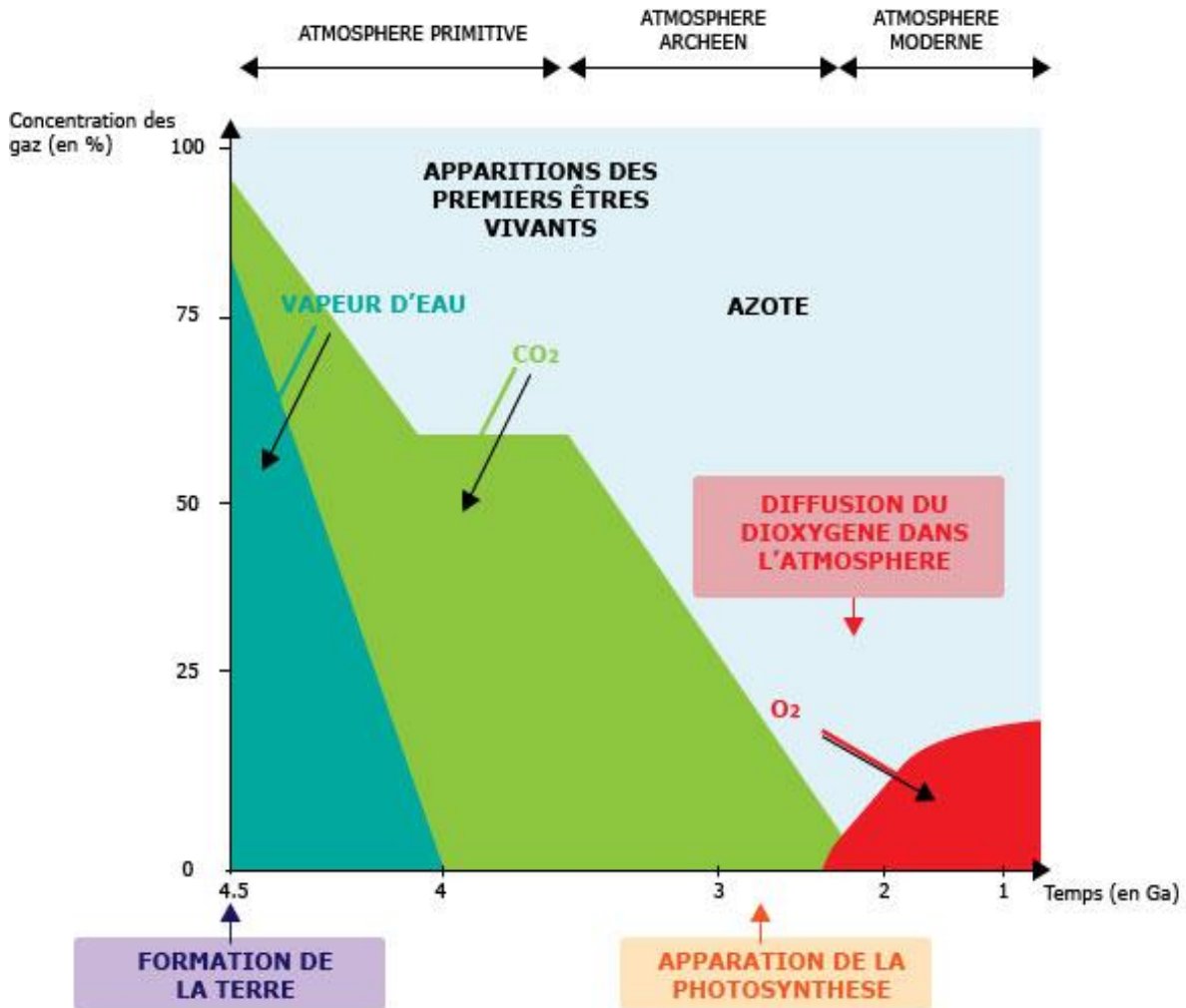


Figure 5 : diagramme de l'évolution de l'atmosphère

III.4. Origine de l'eau

Actuellement, l'hypothèse retenue concernant l'arrivée de l'eau sur Terre est la suivante : l'eau aurait été apportée pour moitié par une pluie de météorites provenant de l'extérieur de la ceinture d'astéroïdes. Les comètes contiennent 50% d'eau et cette eau contient deux fois plus de deutérium que l'eau terrestre. L'autre moitié de l'eau terrestre aurait pour origine le dégazage du manteau (l'eau mantélique ne contient quasiment pas de deutérium). En mélangeant les deux types d'eau, on obtient la quantité de deutérium correspondant à la signature isotopique de l'eau terrestre.

III.5. Origine de la vie

50 millions d'années après sa formation, notre Terre avait donc des océans riches en fer (de couleur verte) et son atmosphère plus dense que l'actuelle lui donnait une teinte rougeâtre. La température à la surface était certainement de l'ordre de 93°C.

Les gaz qui constituent cette atmosphère primitive sont le diazote, le dioxyde de carbone et le méthane.

Petit à petit le bombardement météoritique va se ralentir.

C'est l'étude des stromatolithes qui va fournir une explication à l'apparition du dioxygène de l'atmosphère. Ces cyanobactéries utilisent du dioxyde de carbone et la lumière et rejettent du dioxygène.



Photo 7 : fossiles de stromatolithes

<https://www.shutterstock.com/fr/search/stromatolite>

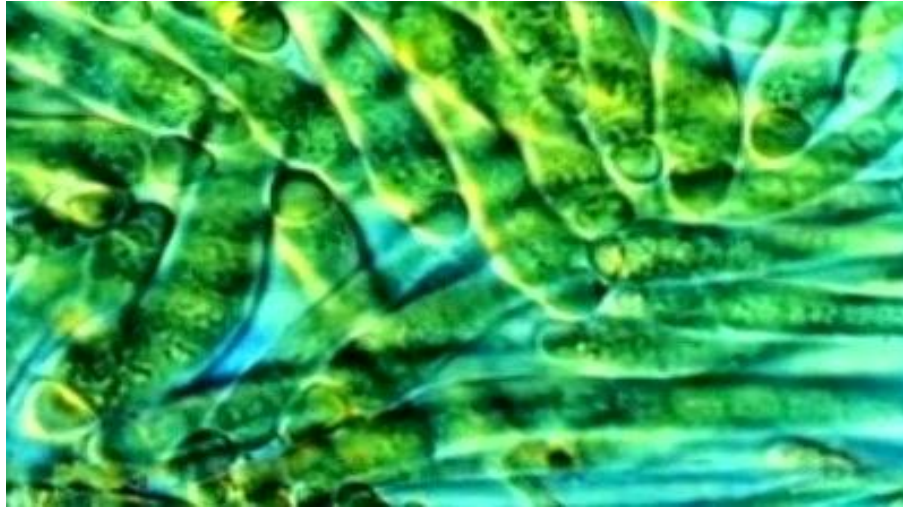


Photo 8 : stromatolithes

<https://www.shutterstock.com/fr/search/stromatolite>

Dans la région du Pilbara (Australie) on peut voir les plus anciens fossiles de stromatolithes (présents il y a environ 3,5 milliards d'années).

Conclusions

La terre primitive a vu le jour, comme une sphère rocheuse non différencié recouverte de laves caractérisées, par la présence les éléments radioactif piégés au moment de de sa création, qui la réchauffe de l'intérieur et la terre attire de plus en plus de corps céleste donc les bombardements s'accroît et la température de surface augmente et la sphère rocheuse se transforme en boule de magma fluide dont les éléments les plus dense (fer), vont plonger en profondeur et les éléments les plus légers vont flotter a la surface (carbone et l'eau), c'est la période de grande migration.

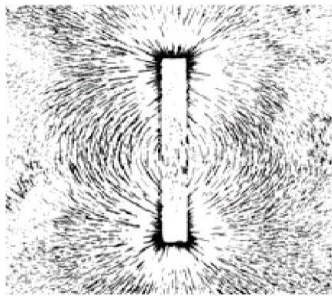
- Le fer liquide concentré au centre de la terre (noyau) en ébullition, qui va élaborer une force invisible va transformer la terre en un aimant géant doté de deux pôles magnétique (pôle nord et pole sud) (figure 6) ;

- Le changement du champ magnétique terrestre indique que les mouvements de convection à l'intérieur de la terre sont toujours en agitation.

Sans ce champ magnétique la terre n'aurait pas d'atmosphère et la terre ne serait pas viable.

Sans noyau fluide la terre serait une masse rocheuse stérile sans champ magnétique et sans atmosphère c'est le cas de la planète de mars.

Champ Magnétique Terrestre



Heath, D.C., 1971

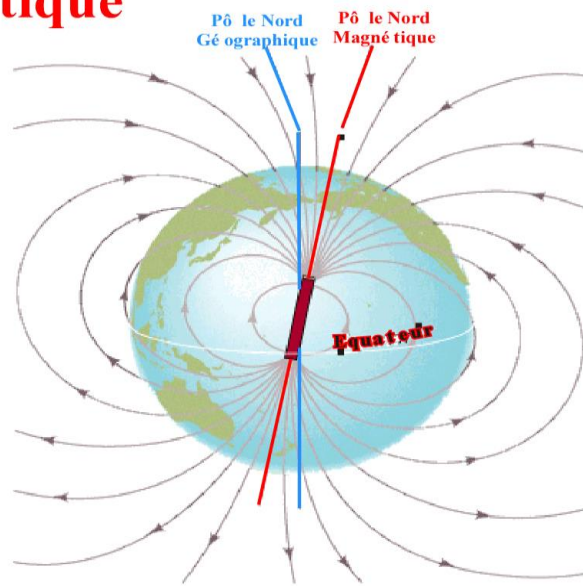


Figure 6 : illustration du champ magnétique terrestre.

Chapitre II

Structure de la planète terre

I. L'atmosphère

L'atmosphère constitue l'enveloppe de gaz et de particules qui entourent notre planète sous l'action de la force de gravitation. On peut considérer que notre atmosphère s'étend sur 500km et que sa masse est de $5 \cdot 10^{18}$ kg, dont la moitié est située en dessous de 5.5km et 90% en dessous de 10km (à comparer aux 6378km de rayon terrestre !).

La composition chimique de l'atmosphère et la structure thermique qui en résulte permettent de distinguer 4 enveloppes atmosphériques, de bas en haut : troposphère, stratosphère, mésosphère et thermosphère.

plus on s'éloigne de la surface de la Terre moins l'atmosphère est dense, cela signifie que plus l'altitude augmente moins il y a de molécules dans un volume donné d'atmosphère. Le passage de l'atmosphère à l'espace est donc progressif et décider d'une limite supérieure pour l'atmosphère est d'autant plus difficile.

La notion de diminution de densité de l'atmosphère avec l'altitude, sans jamais vraiment atteindre une valeur de densité nulle est identique à celle d'une courbe s'approchant indéfiniment de son asymptote sans jamais la toucher. La figure suivante illustre cette notion. Elle ne représente pas l'évolution de la densité de l'atmosphère avec l'altitude mais la distribution de la masse de l'atmosphère en fonction de l'altitude, qui a été déduite des valeurs de densité. L'axe des ordonnées indique la proportion massique de l'atmosphère. Sur cette figure l'asymptote est la ligne horizontale.

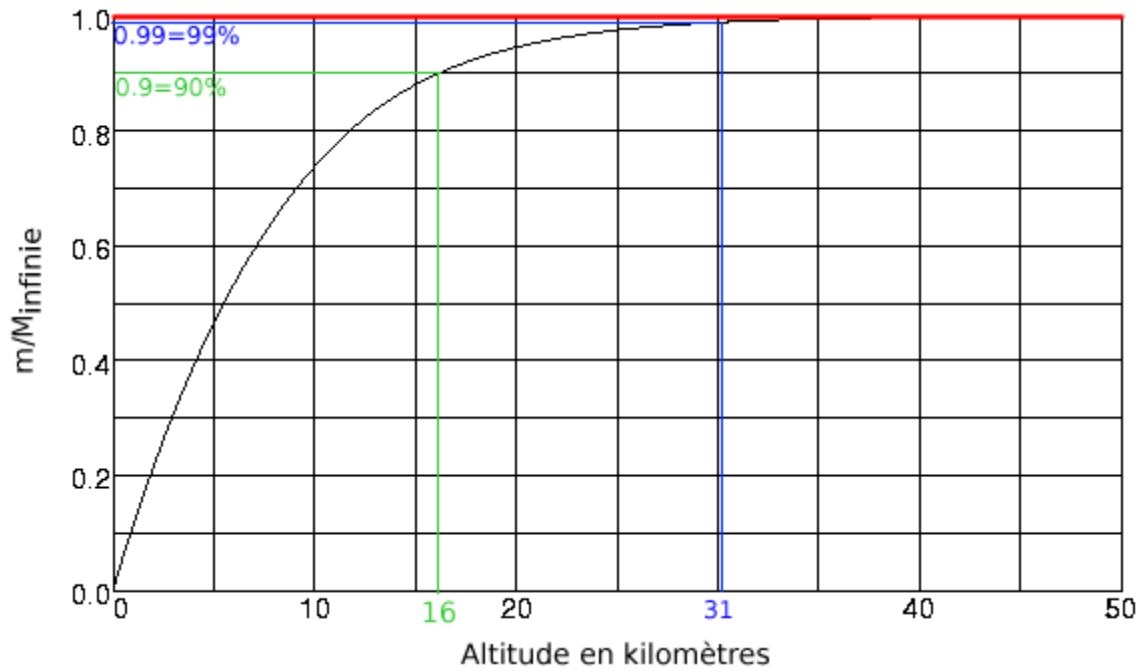


Figure 1 : évolution de la densité atmosphérique en fonction de l'altitude

I.1. Structure de l'atmosphère

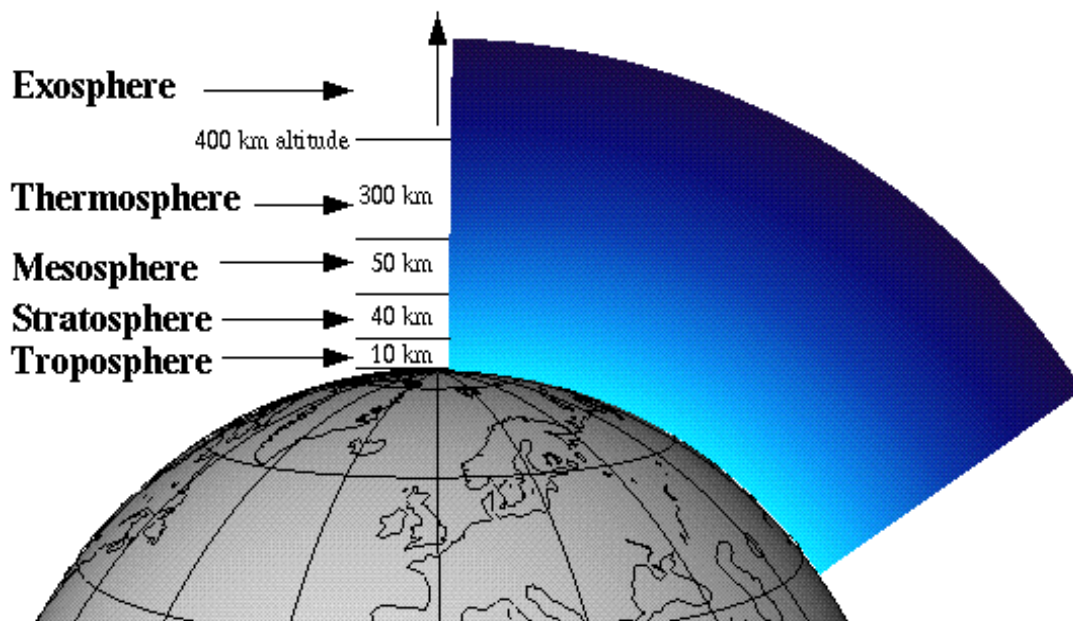


Figure 2 : structure de l'atmosphère

a. La Troposphère:

Est située entre la surface du globe et une altitude d'environ 8-15 km, selon la latitude et la saison. Plus épaisse à l'équateur qu'aux pôles. Cette couche atmosphérique contient 90% de la masse totale de l'atmosphère, très importante car on y trouve l'air que l'on respire. La température diminue avec l'altitude, à peu près de 10°C tous les 1000 m. On y trouve également la plupart des phénomènes météorologiques.

Cette couche se trouve sous la stratosphère via sa limite supérieure appelée tropopause, qui marque aussi la limite de la biosphère.

b. La Stratosphère:

Cette couche de l'atmosphère terrestre se poursuit jusqu'à une altitude de 50 km. Alors que dans la troposphère la température décroît avec l'altitude, on observe le phénomène inverse dans la stratosphère.

Cette augmentation (d'environ -60°C à 0°C) est due à l'absorption par la couche d'ozone de la plus grande partie du rayonnement ultra-violet. Cet accroissement de T° avec l'altitude se nomme "inversion" et a comme caractéristique d'être très stable; très peu de mouvements verticaux dans cette masse d'air sont observés, c'est donc pour cela que les couches d'air forment des "strates", phénomène à l'origine du nom stratosphère.

Cette couche précède la mésosphère par sa limite appelée stratopause.

c. La Mésosphère:

Celle-ci quant à elle se situe entre 50 et 90 km d'altitude. La température y décroît avec cette dernière. C'est à sa limite supérieure que l'on trouve les températures les plus basses, pouvant atteindre -73°C voir encore moins.

C'est aussi une zone de transition entre l'espace et la terre, en effet les couches suivantes sont très pauvres en air et donc moins denses, n'offrant quasiment pas de résistance et donc pas d'échauffement lors de son franchissement (météorites, navettes spatiales, ...). C'est donc à partir de la mésosphère que l'on commence à trouver de l'air.

d. Thermosphère:

Cette couche débute à partir de 90-100 km. Elle constitue avec l'exosphère (couche suivante) "l'hétérosphère" où la composition de l'air n'est plus uniforme. La limite de la thermosphère avec l'exosphère dépend de l'activité solaire, elle est donc très variable. De 100 à 150 km d'altitude, l'oxygène moléculaire absorbe l'ultra-violet de très courte longueur d'onde. En résulte donc une augmentation de T°C oscillant entre 300°C et 1600°C !!! (Selon l'activité solaire).

La température y est très élevée mais la densité de matière extrêmement faible. Le constituant principal de la thermosphère est l'oxygène atomique (O) issu de la dislocation des molécules d'oxygène (O₂).

La couche suivante est l'exosphère séparée de la thermosphère via la thermopause.

e. Exosphère:

Couche venant clore la ceinture gazeuse terrestre. Définie comme la région où les collisions entre particules sont rares, considérées comme négligeables. Sa base (exobase) se situe entre 350 et 800 km suivant la température à la thermopause, qui est liée à l'activité solaire

L'hélium et l'oxygène y sont les éléments prépondérants.

L'exosphère s'étend jusqu'à la limite extrême de l'atmosphère, soit 50 000 km. On ne trouve plus là que quelques atomes d'hydrogène. C'est dans cette zone que la plupart des satellites sont placés en orbite.

II. Structure interne de la terre

Pour étudier la structure interne de la terre, deux types d'investigations sont utilisées :

a. Investigations directes par :

- l'exploration humaine : la spéléologie (étude de étendus de terrains sédimentaires ;
- les forages profonds (9800m an Allemagne et 13km en Russie pour connaitre la lithosphère et la zone de transition entre celle-ci et le manteau supérieur : le Moho ;
- l'étude des météorites.

b. Investigation indirectes (géophysique) par :

- la tomographie sismique ;
- l'étude du magnétisme.

La partie superficielle du globe terrestre accessible par forages ou puits, est appelée croûte. 71% de la surface du globe est recouverte par les océans : planète "océane" et 29% de terres émergées. La croûte est constituée d'une croûte continentale et d'une croûte océanique.

L'étude de la propagation des ondes sismiques (naturelles ou provoquées) fournit des renseignements intéressants sur l'épaisseur de la couche la plus externe du globe ainsi que ces parties les plus profondes.

II.1. La tomographie sismique

Introduction

Les séismes sont des événements brefs et brutaux qui se manifestent par des secousses du sol parfois violentes. Ils peuvent engendrer des dégâts considérables dans les zones habitées et causer un nombre important de victimes. Ils sont en étroite relation avec la tectonique des plaques. Selon la profondeur, on distingue les séismes superficiels à moins de 100 km, intermédiaires de 100 à 300 km, profonds de 300 à 700 km (pas de séismes au-delà de 700 km de profondeur).

II.1.1. Répartition des séismes sut terre (figure 3)

Les tremblements de terre se produisent partout dans le monde, mais la majorité se produisent sur des cassures instables appelées failles actives qui délimitent les grandes plaques tectoniques de la Terre, effectivement, 95% des séismes dans le monde se produisent aux frontières de ces plaques. Le « ceinture du feu » de l'océan Pacifique, est l'une des zones les plus actives au monde.

SISMICITE MODIALE : 30 ans - 17 000 seismes de magnitude superieure à 4.5

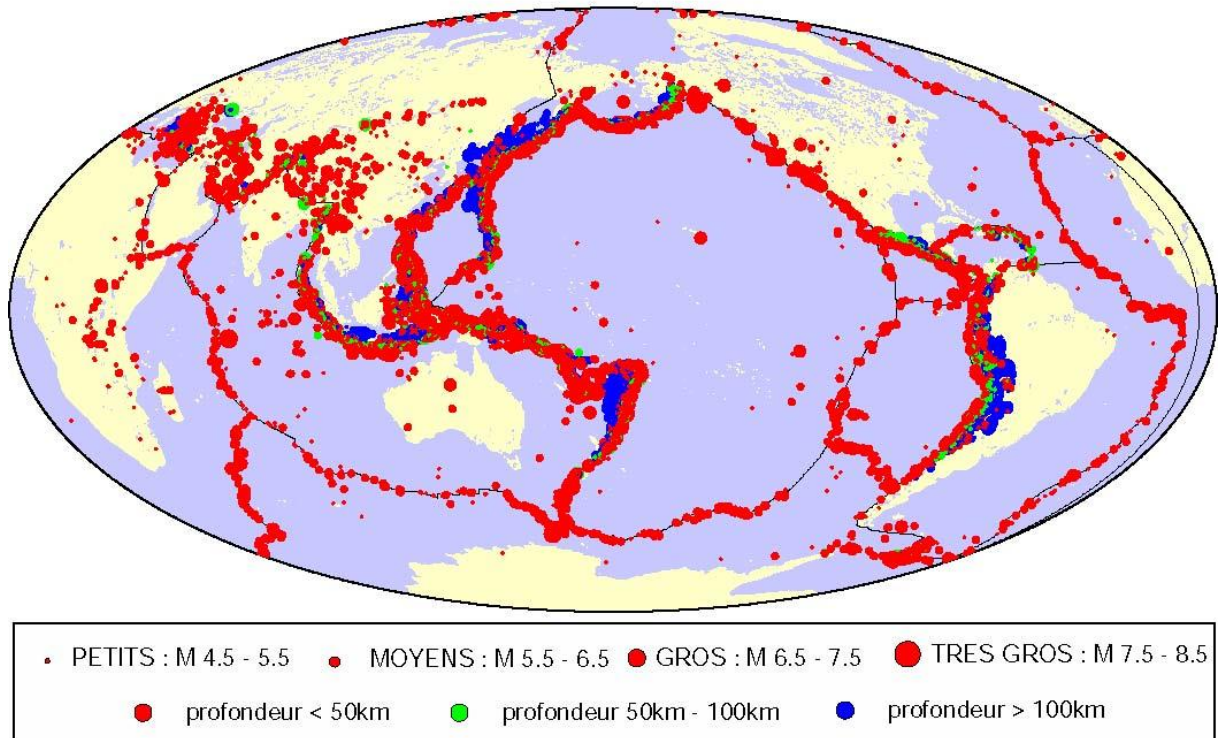


Figure 3 : Répartition des séismes sur terre dans les 30 dernières années

II.1.2. Mécanisme du séisme (figure 4)

Au niveau de ces failles, les roches de l'écorce terrestre sont soumises à d'importantes forces et contraintes. Vu leur rigidité, les roches résistent et ne se déplacent pas au début, mais dès que les forces dépassent leur résistance, les roches se déplacent subitement en libérant de l'énergie qui fait trembler la terre.

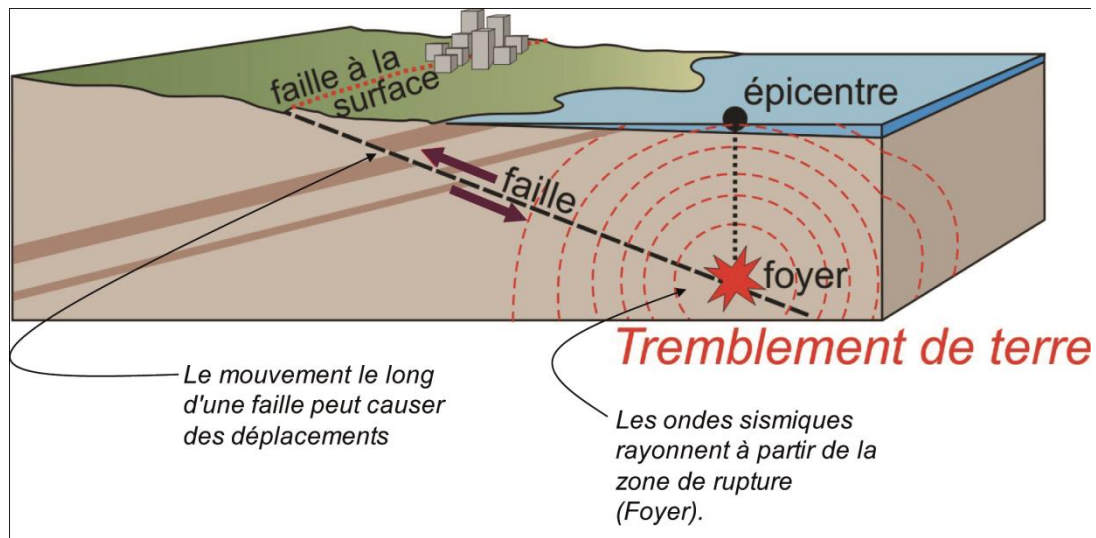


Figure 4 : mécanismes des séismes

Les failles : ce sont des fractures ou zones de rupture dans la croûte terrestre où il y a eu mouvement

Foyer : appelé aussi **hypocentre**, c'est le point, à l'intérieur de la Terre, qui est situé là où l'énergie se libère lors d'un tremblement de terre. C'est le point où se produit réellement le séisme.

Épicentre : c'est l'endroit sur la surface terrestre directement au-dessus de l'emplacement du séisme. L'épicentre est situé au vertical du foyer.

II.2. Ondes sismiques

Les ondes sismiques correspondent à des vibrations provenant d'un séisme et se propagent vers l'extérieur dans toutes les directions de l'espace depuis le foyer.

II.2.1. Types d'ondes sismiques (figure 5)

a. Ondes de volume

Les ondes de volume se propagent à l'intérieur de la terre. La vitesse du déplacement dépend du matériau traversé. Elles sont plus rapides dans les milieux rigides, ainsi, leur vitesse augmente avec la profondeur de la terre. Deux types d'ondes sont distingués :

- **Les ondes P ou ondes primaires :** appelés aussi onde de compression. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par des dilatations et des compressions successives. Ces déplacements du sol sont parallèles à la direction de propagation de l'onde. Elles se

propagent dans tous les milieux et sont les plus rapides (6 km/s près de la surface), ce sont donc les premières à être enregistrées sur les sismogrammes.

- **Les ondes S ou ondes secondaires** : appelées aussi ondes de cisaillement. Les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides. Ce sont les deuxièmes à être enregistré par un sismogramme.

b. Ondes de surface

Elles se propagent à la surface de la terre, et sont moins rapides que les ondes de volume.

Deux types d'ondes sont distinguées :

- **L'onde de Love** : Les ondes de Love provoquent des secousses horizontales qui sont la cause de nombreux dégâts observés dans les fondations.
- **L'onde de Rayleigh** : Son déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, constituant un mouvement à la fois horizontal et vertical.

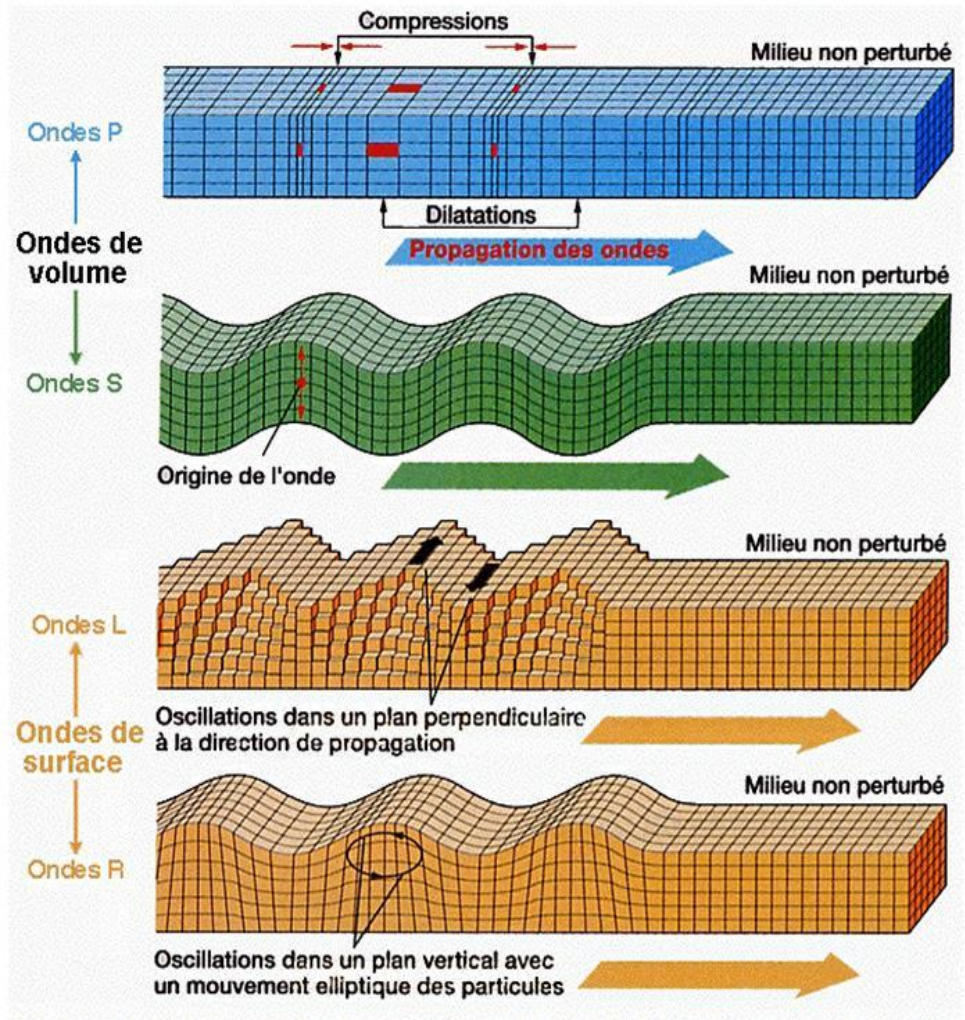


Figure.5 : caractéristiques des ondes sismiques

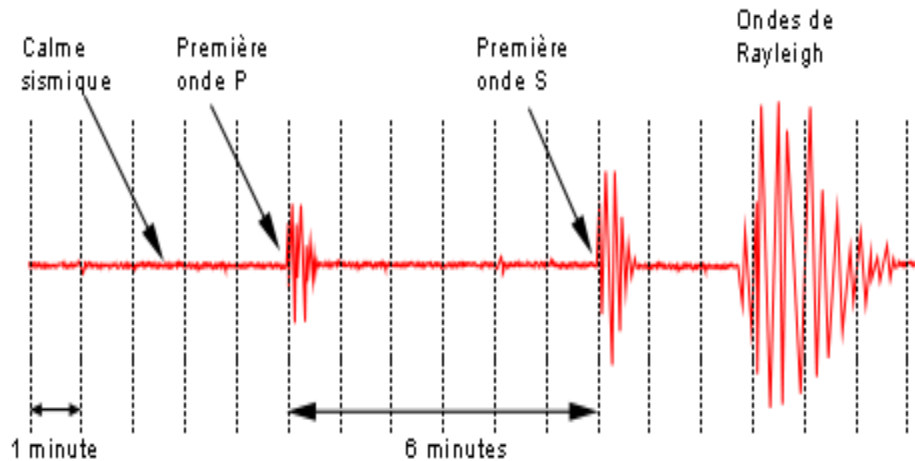


Figure.5 : différence des temps d'arrivés des ondes sismiques

II.2.2. Utilité de l'étude des ondes sismiques

a. Structure interne de la terre (figure.6)

La structure interne de la Terre, ainsi que l'état et la densité de la matière, ont été déduits de l'analyse du comportement des ondes sismiques. Les ondes P se propagent dans les solides, les liquides et les gaz, alors que les ondes S ne se propagent que dans les solides. Ainsi que leur vitesse de propagation est proportionnelle à la densité du matériel traversé.

Les principaux points déduits sont :

- **Le noyau externe est liquide** : interruption de propagation des ondes S ;
- **Augmentation de densité en s'enfonçant dans le manteau, et du noyau externe vers le noyau interne** : L'augmentation progressive de la vitesse des ondes P et S ;
- **Le passage d'un matériel solide (lithosphère) à un matériel plastique (asthénosphère)** : chute légère de vitesse de propagation des ondes P et S.

b. Localisation de l'épicentre d'un séisme (figure.7)

La différence des temps d'arrivée des ondes P et S permet de localiser l'épicentre d'un séisme à l'aide de trois sismogrammes. La différence des temps est utilisée pour calculer la distance qui sépare chaque station de sismogrammes par rapport à l'épicentre. Ensuite, on construit trois cercles de rayon égal à la distance calculée, l'intersection des trois cercles correspond à l'épicentre du séisme.

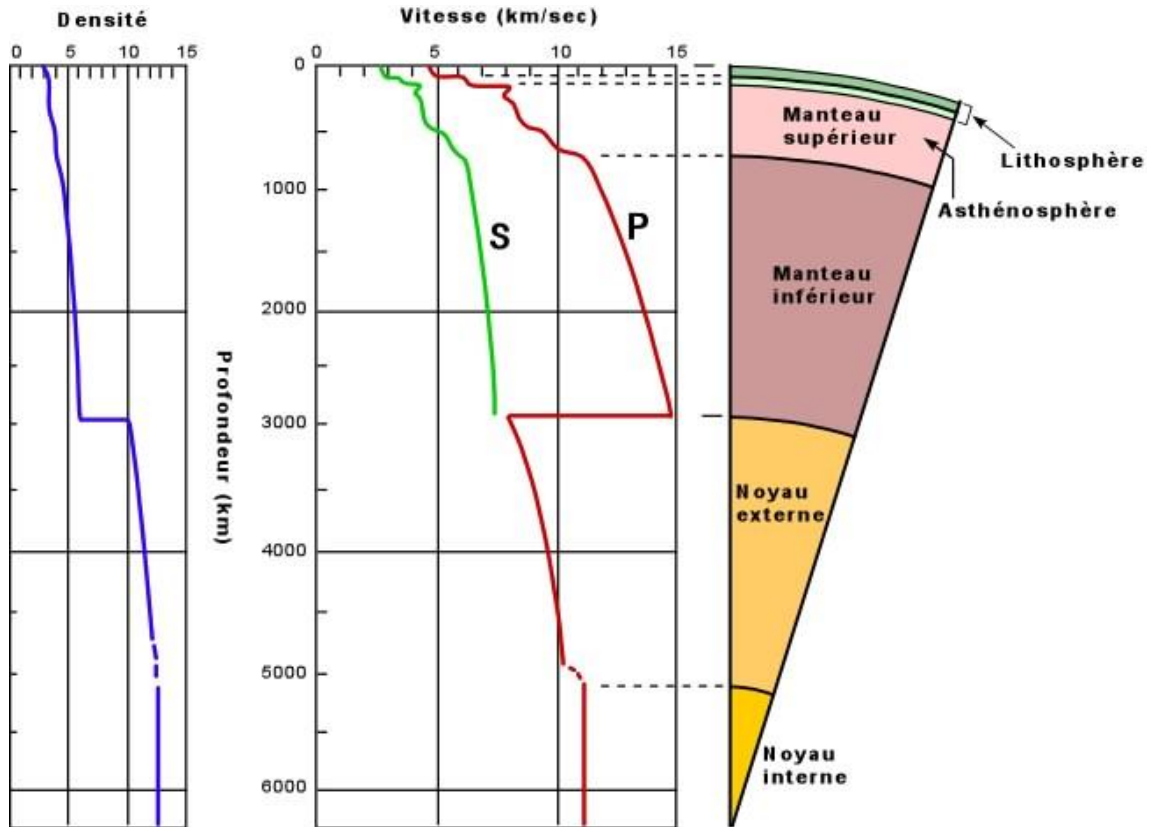


Figure.5 : vitesse de propagation des ondes sismiques et structure interne de la terre

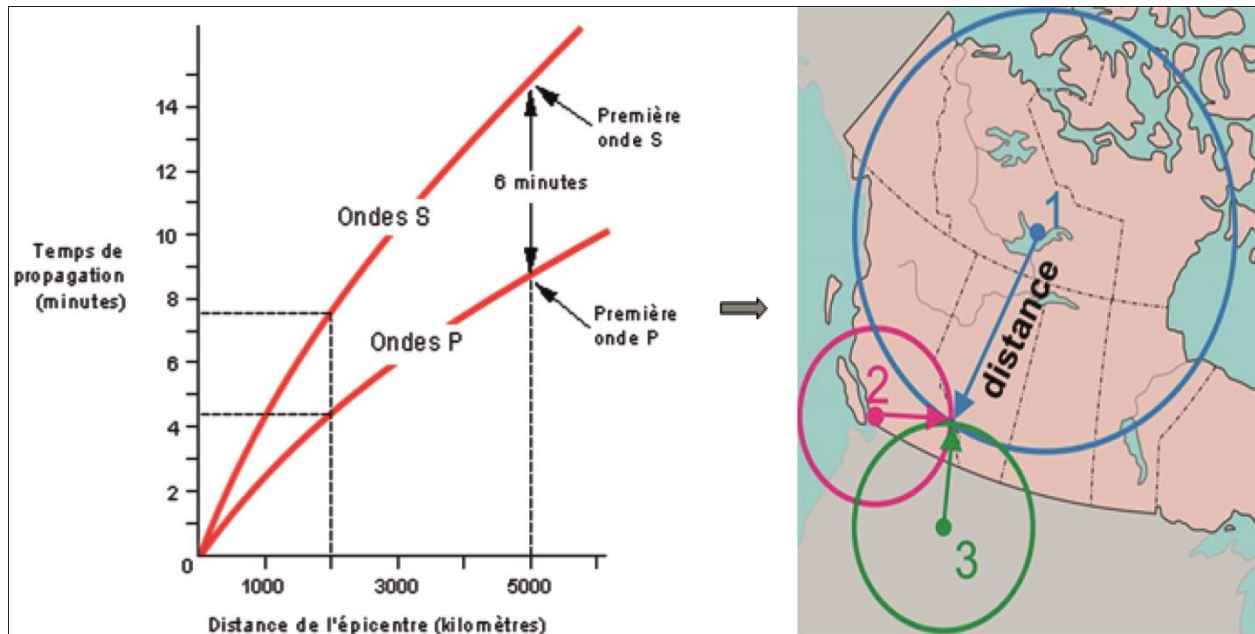


Figure.6 : méthode de localisation de l'épicentre

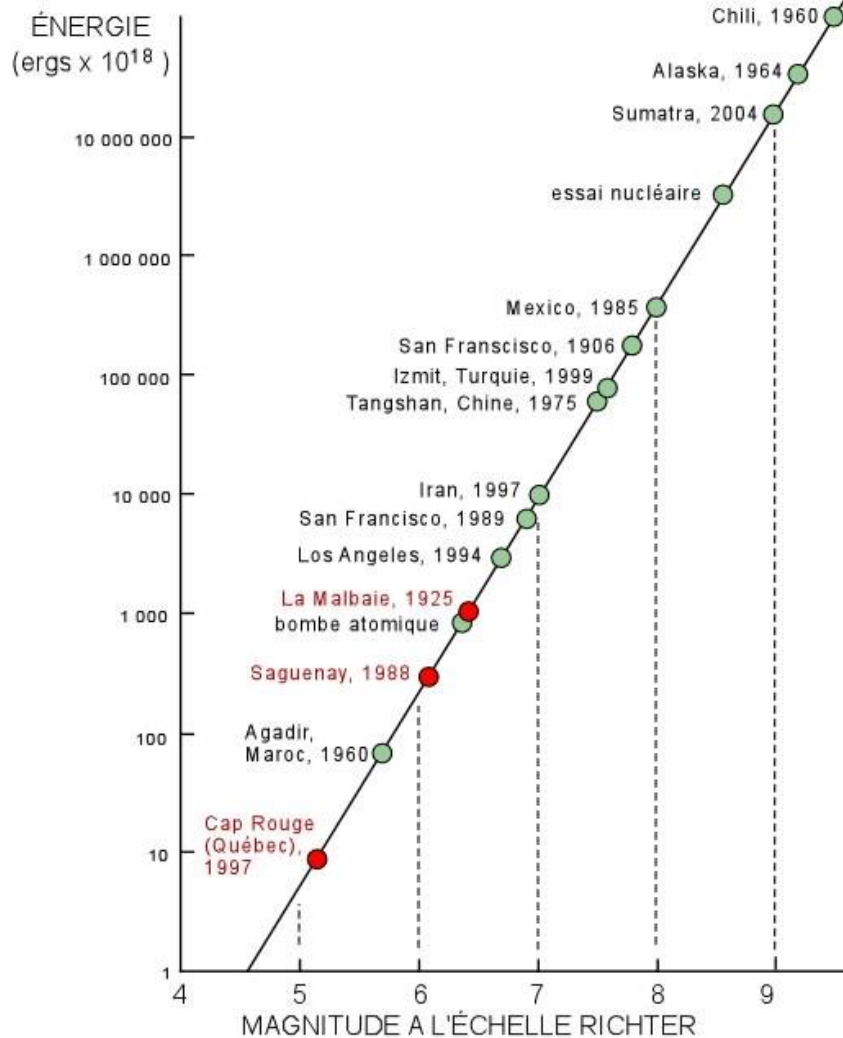
c. Magnitude, Intensité et Impact

c.1. Magnitude

La magnitude est la mesure de l'énergie libérée par le séisme. Il s'agit donc d'une valeur unique même s'il existe différentes manières de la calculer grâce à la trace sismique enregistrée par plusieurs sismomètres. L'échelle de magnitude la plus connue est celle de **Richter**. Actuellement, les sismologues préfèrent utiliser la **magnitude de moment** (M_w) qui prend en compte à la fois la localisation, le mécanisme au foyer (mouvement de la faille) et le moment sismique.

c.2. Intensité

L'intensité est une mesure des dommages causés par un tremblement de terre. Elle sera généralement plus importante plus la magnitude du séisme est grande mais il dépend aussi de paramètres indépendants comme la localisation de l'hypocentre (ou foyer sismique) le comportement de la croûte terrestre ou la qualité des constructions. L'échelle d'intensité sismique la plus connue est celle de **Mercalli**.



ÉCHELLE D'INTENSITÉ DE MERCALLI	MAGNITUDE À L'ÉCHELLE RICHTER
I Séisme perçu uniquement par quelques personnes dans des circonstances particulières; détecté seulement par des instruments très sensibles.	2
II Perçu par quelques personnes au repos et se trouvant aux étages supérieurs; balancement d'objets suspendus.	3
III Perçu principalement par des personnes à l'intérieur des édifices. Les automobiles stationnées peuvent bouger.	
IV Perçu par la plupart des gens à l'intérieur des édifices et par certains à l'extérieur; suffisant pour réveiller certaines personnes. Bruits de vaisselle, fenêtres et portes.	4
V Perçu par presque tout le monde; plusieurs personnes sont réveillées. Bris de vaisselle et de fenêtres; les objets instables sont renversés.	5
VI Perçu par tout le monde; plusieurs personnes sont effrayées et courent à l'extérieur; quelques meubles sont déplacés; quelques morceaux de plâtre tombent et quelques dommages aux cheminées. Dommages légers.	
VII La plupart des gens paniquent et courent à l'extérieur; dommages minimes aux constructions conçues pour les zones sismiques, de minimes à moyens chez les bonnes constructions ordinaires, importants chez les mauvaises constructions. Meubles renversés.	6
VIII Dommages légers aux constructions conçues pour les zones sismiques, importants chez les bonnes constructions ordinaires avec des effondrements possibles, catastrophiques chez les mauvaises constructions.	7
IX Dommages considérables aux constructions conçues pour les zones sismiques. Edifices déplacés sur leurs fondations. Fissuration du sol. Bris des canalisations souterraines.	
X Quelques bonnes constructions en bois et la plupart des constructions en maçonnerie sont détruites. Sol fortement fissuré. Plusieurs glissements de terrain se produisent.	8
XI Très peu de constructions en maçonnerie restent debout; rails tordus; ponts détruits. Grandes fissures dans le sol.	
XII Destruction quasi totale. Ondulations visibles à la surface du sol. Objets projetés dans les airs.	9

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.

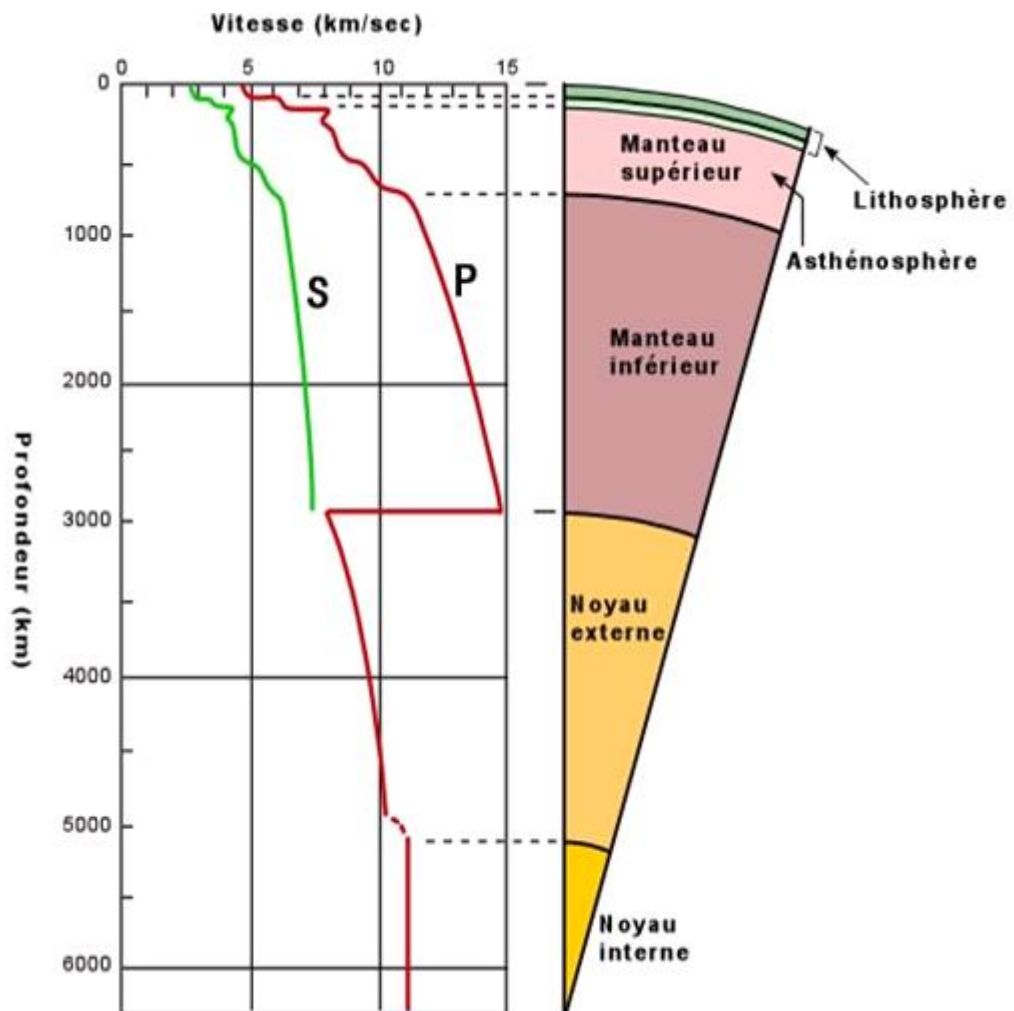


Figure 7. : Composition interne de la terre sur la base de la vitesse des ondes sismiques

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 :

- **La croûte continentale et la croûte océanique** se distinguent par leur épaisseur. Elles diffèrent aussi par la nature des roches qui les constituent : la croûte océanique est essentiellement formée de basaltes et de gabbros alors que la croûte continentale

est surtout granitique. Cette différence de nature chimique entraîne une variation de leur densité et donc de la propagation des ondes sismiques qui les traversent.

- **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.

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. 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.

En effet, deux catégories de subdivisions sont parallèlement utilisées pour identifier l'intérieur du globe:

- - Sur la base des discontinuités majeures des vitesses des ondes sismiques;
- - Sur la variation de la densité des couches traversés.

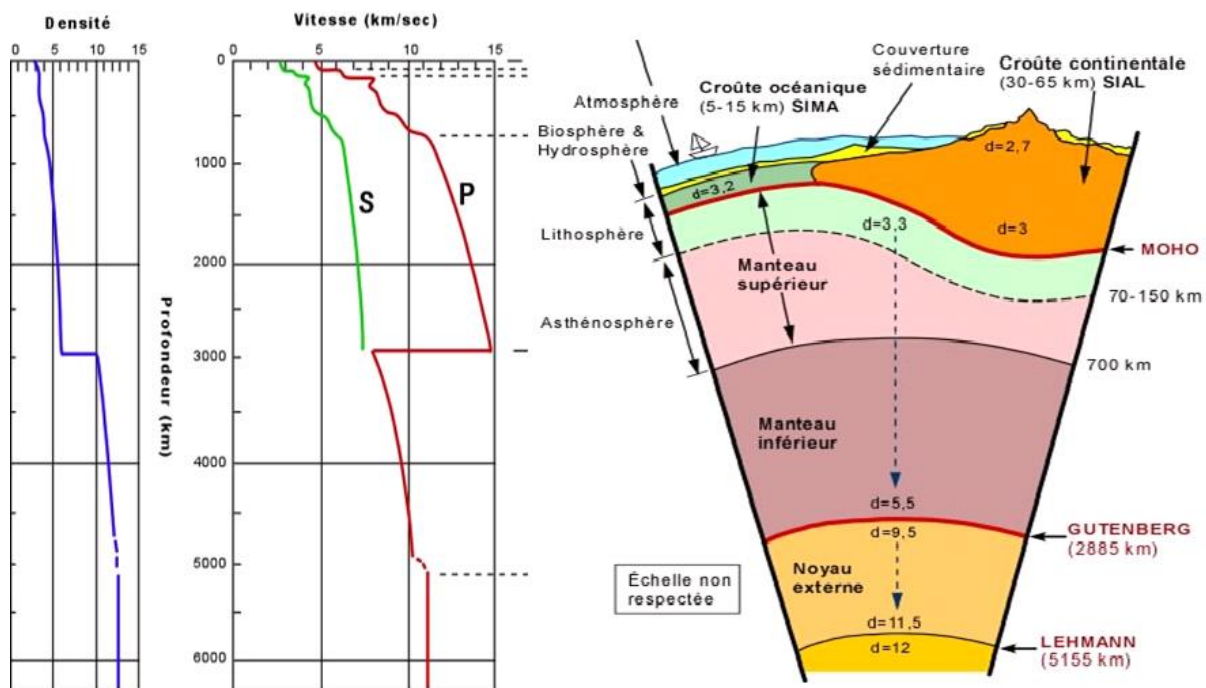


Figure 6 :

Sur la base de la composition chimique :

- **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 déterminés sous forme d'oxydes - lesquels sont en beaucoup plus faible pourcentage; on peut citer principalement CaO , MgO , FeO .
- **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.
- **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.

Le modèle thermique de la terre (figure 7)

La température croit 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 élevées, incompatible avec son état solide de la graine.

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).

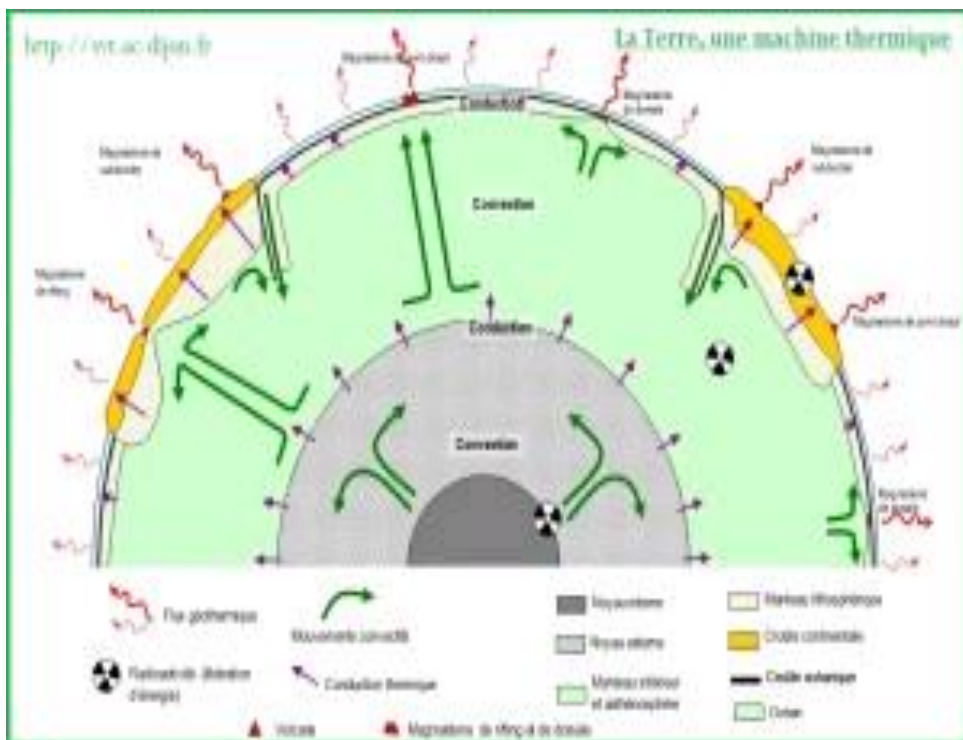


Figure 7 : illustration du model thermique de la terre

Chapitre III

La notion du temps en géologie « la datation »

Introduction

La datation est l'attribution d'une date. Ce terme peut donc s'appliquer à un évènement passé, un objet, un document, un fossile, une couche géologique ou encore un niveau archéologique.

Deux types de datation se distinguent clairement :

- La chronologie relative
- La chronologie absolue

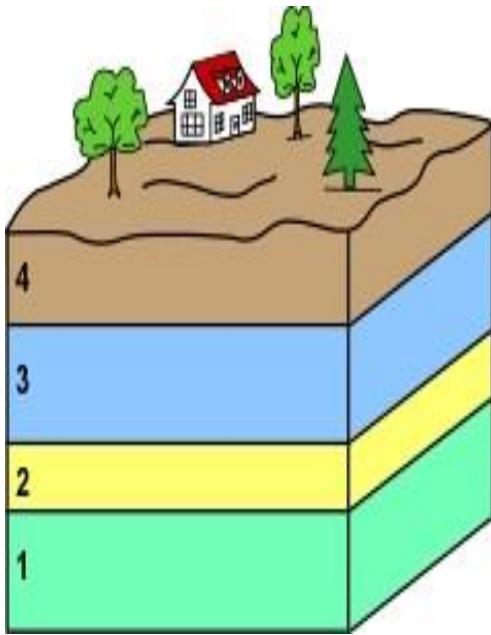
I. La chronologie relative

C'est la datation des événements les uns par rapport aux autres par :

- L'utilisation de principes géométriques simples ;
- Les méthodes paléontologiques.

I.1 Les méthodes physiques de datation relative

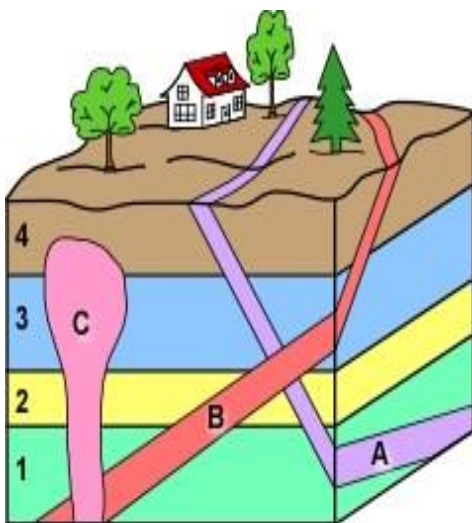
- **Le principe de continuité** : une même couche a le même âge sur tout son étendu.
- **Le principe de superposition (figure 1)** : dans les terrains non-déformés, les formations les plus basses sont les plus anciennes et les formations les plus hautes sont les plus jeunes. C'est la façon d'exprimer l'âge relatif.



Le concept de Steno (1669) qui présente deux principes intimement liés apparaît simpliste, mais il est fondamental: les couches sédimentaires se sont d'abord déposées à l'horizontale (principe de l'horizontalité primaire); les couches se sont superposées les unes sur les autres, ce qui implique que celle qui est sous une autre est plus vieille que cette dernière (principe de la superposition).

Figure 1 : Principe de superposition

Le principe de recoupement (figure2) : les couches sont plus anciennes que les failles ou les roches qui les recourent.



Ici, l'âge relatif des couches 1 à 4 est fourni par le principe de superposition. Les intrusifs A, B et C sont plus jeunes que les couches sédimentaires horizontales dans lesquelles ils se sont introduits. Leurs âges relatifs sont donnés par les recoupements: comme le dyke B recoupe le dyke A et que l'intrusif C recoupe le dyke B, on sait que A est plus ancien que C, même si ces deux dykes ne se recoupent pas; l'ordre d'intrusion est donc A B et finalement C.

Figure 2 : Principe de recoupement

Le principe d'horizontalité : les couches sédimentaires sont déposées à l'origine horizontalement. Une séquence sédimentaire qui n'est pas en position horizontale aurait subi des déformations ultérieurement à son dépôt.

I.2. Méthodes paléontologiques

Les fossiles peuvent être très abondants dans certaines couches. Ils constituent la méthode par excellence de datation des couches géologiques. Depuis le temps qu'on les étudie, on a constitué des archives importantes, des sortes de catalogues qui répertorient les divers genres et espèces, avec les localités où ils ont été récoltés, ainsi que leurs âges respectifs selon l'échelle relative des temps géologiques.

La méthode des fossiles pilotes. Cette méthode utilise évidemment les fossiles à courte durée de vie qui indiquent des âges bien précis. Une couche contenant un de ces fossiles pourra donc être datée avec assez de précision. Cependant, on ne trouve pas toujours de tels fossiles.

La méthode des assemblages fossilifères. Cette méthode se fonde sur la somme des fossiles trouvés dans une couche donnée. On assume que tous les fossiles trouvés ensemble sur une couche sédimentaire représentent des organismes qui ont tous vécu au même temps.

Supposons que l'on veuille connaître quand la photo suivante a été prise

Photo de famille



Le père a vécu de 1903 à 1973 (bande verte), que sa fille est née en 1934 et vit toujours, et que le petit-fils est né en 1972 mais décédé en bas âge, en 1980.

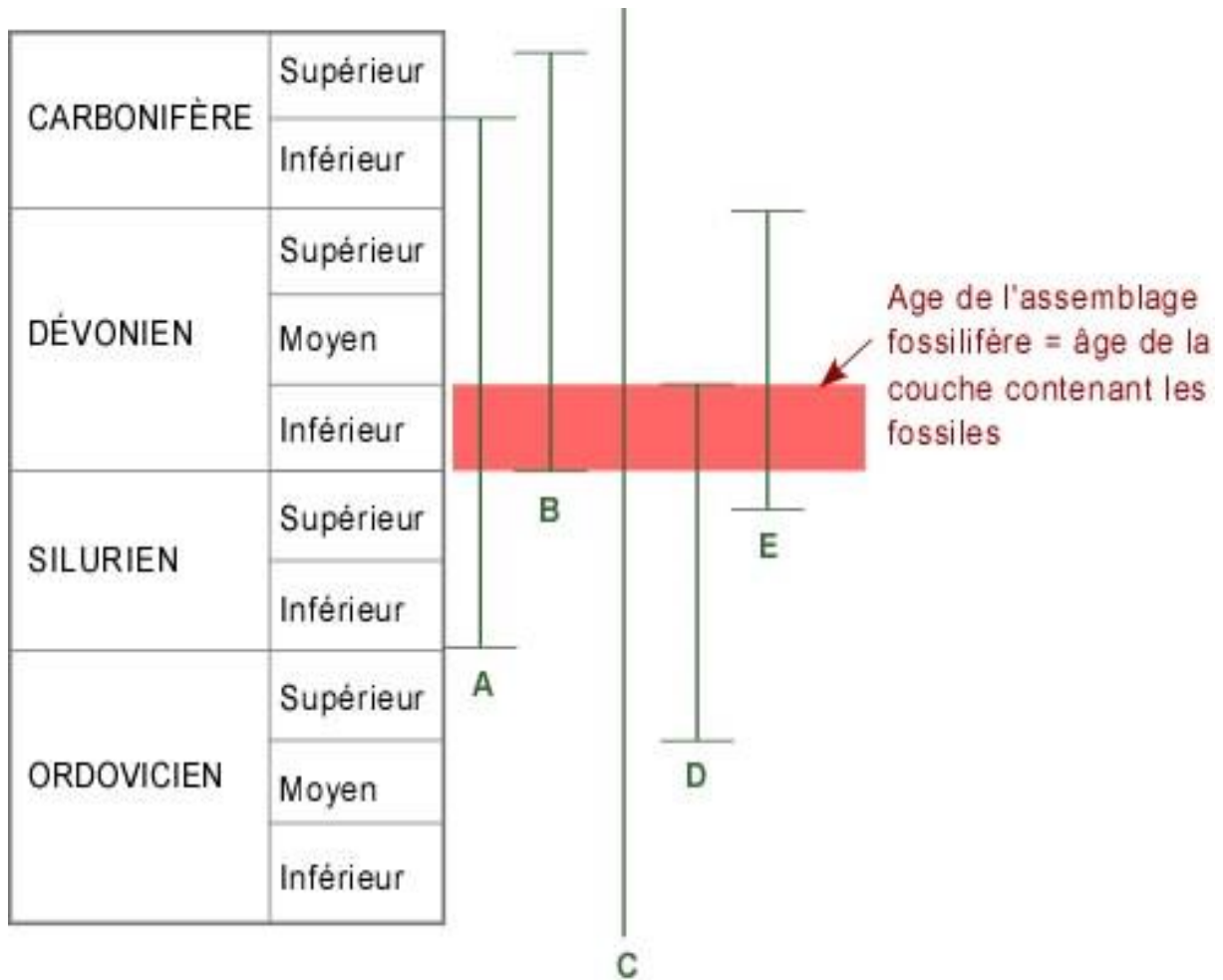


Figure 3 : méthode des assemblages fossilifères

La méthode des lignées évolutives (figure 4) : La recherche paléontologique sur l'évolution de divers groupes biologiques durant les temps géologiques a mis en évidence plusieurs lignées évolutives, souvent sur de courtes durées de temps.

Pour illustrer l'utilité de ces lignées pour les datations relatives, prenons l'exemple d'une lignée évolutive des espèces d'un genre donné, soit les espèces A, B, C, D et E, avec un bon contrôle de la répartition temporelle de chacune des espèces.

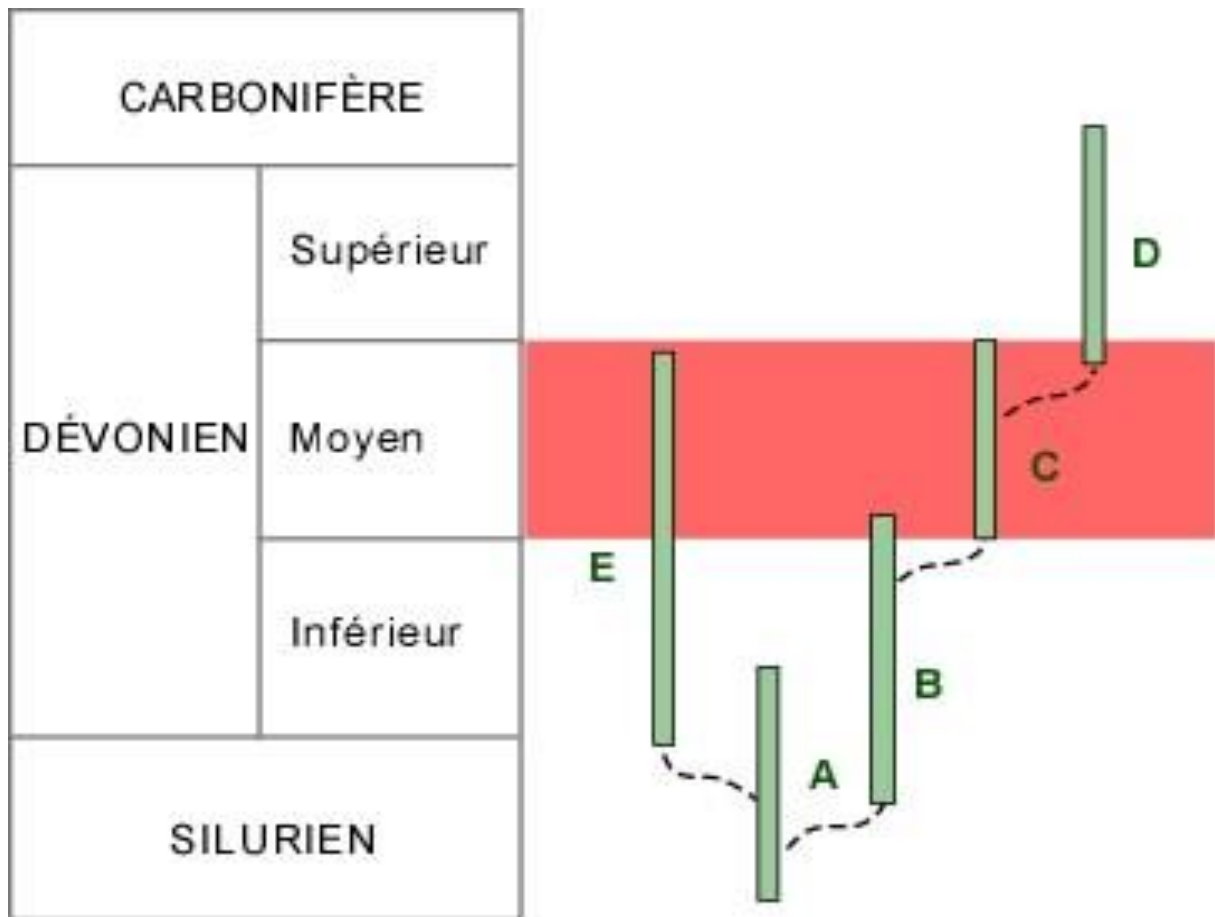


Figure 4 : méthode des lignées évolutives

ÈRES	PÉRIODES	ÉPOQUES	Extinctions biologiques majeures
CÉNOZOÏQUE	QUATERNAIRE	Holocène (récent) Pléistocène	
	TERTIAIRE	Pliocène Miocène Oligocène Éocène Paléocène	←
MÉSOZOÏQUE (Secondaire)	CRÉTACÉ		←
	JURASSIQUE		←
	TRIAS		←
PALÉOZOÏQUE (Primaire)	PERMIEN		←
	CARBONIFÈRE		
	DÉVONIEN		←
	SILURIEN		
	ORDOVICIEN		
	CAMBRIEN		←
PRÉCAMBRIEN	PROTÉROZOÏQUE		
	ARCHÉEN		

Figure 5 : Une échelle relative des temps géologiques

II. La chronologie absolue

Qu'appelle-t-on un isotope ?

On appelle isotopes des atomes qui possèdent le même nombre d'électrons et le même nombre de protons, mais qui diffèrent par le nombre de neutrons présents dans leur noyau. Ce sont donc des formes différentes d'un même élément (isotopes signifie "qui se trouvent à la même place" dans la table de Mendeleïev) ayant des propriétés chimiques pratiquement identiques, puisque celles-ci ne dépendent que du nombre et de la configuration des électrons. Par contre leurs propriétés nucléaires peuvent être différentes. En particulier certains peuvent être radioactifs alors que d'autres sont stables.

Qu'est-ce que la radioactivité?

L'atome (figure 6) est composé d'un noyau (protons + neutrons) autour duquel gravitent les électrons. Toute la masse de l'atome est concentrée dans le noyau, les électrons ayant une masse négligeable

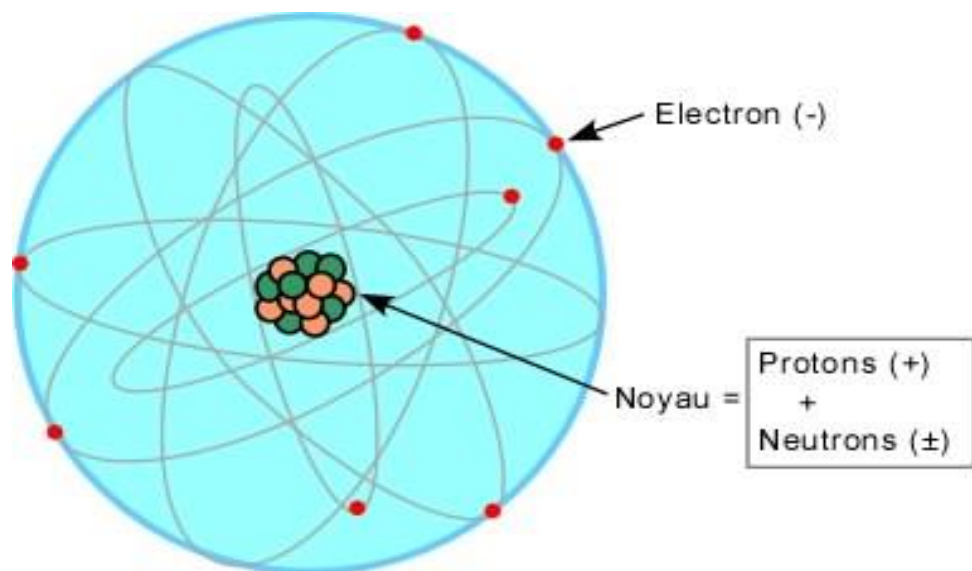


Figure 6 : structure de l'atome

Masse atomique = noyau = nombre de protons + nombre de neutrons

Numéro atomique = nombre de protons (+)

La radioactivité est due à l'instabilité du noyau qui se désintègre par émission d'énergie, principalement sous deux formes:

particule α = 2 protons (+) + 2 neutrons (\pm) :

d'où une perte de 4 dans la masse atomique et une perte de 2 dans le numéro atomique;

particule β^- = 1 électron (-) : Il y a donc gain d'un proton.

La réaction de désintégration peut se résumer ainsi: un élément parent se transforme progressivement en un élément rejeton. Cette désintégration met un certain temps à se faire; c'est ce paramètre temps qui nous intéresse.



Voici une illustration qui permet de mieux visualiser ce qu'on entend par demi-vie.

Prenons la réaction Uranium 238 - plomb 206 qui a une demi-vie de 4,5 Ga.

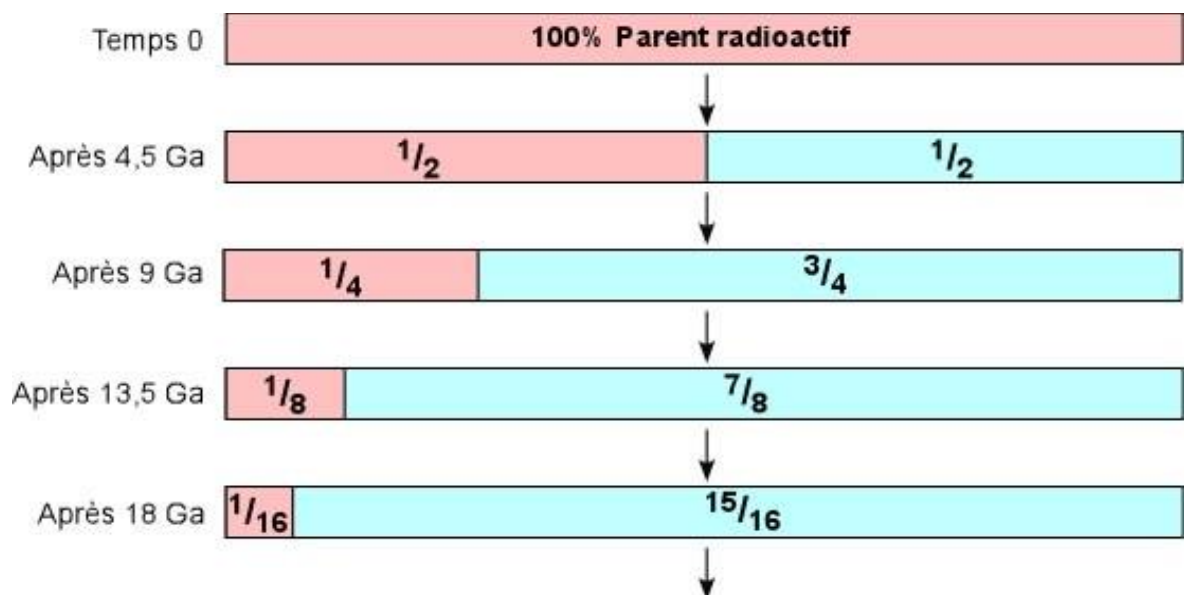


Figure 7 : illustration d'une réaction de désintégration radioactive

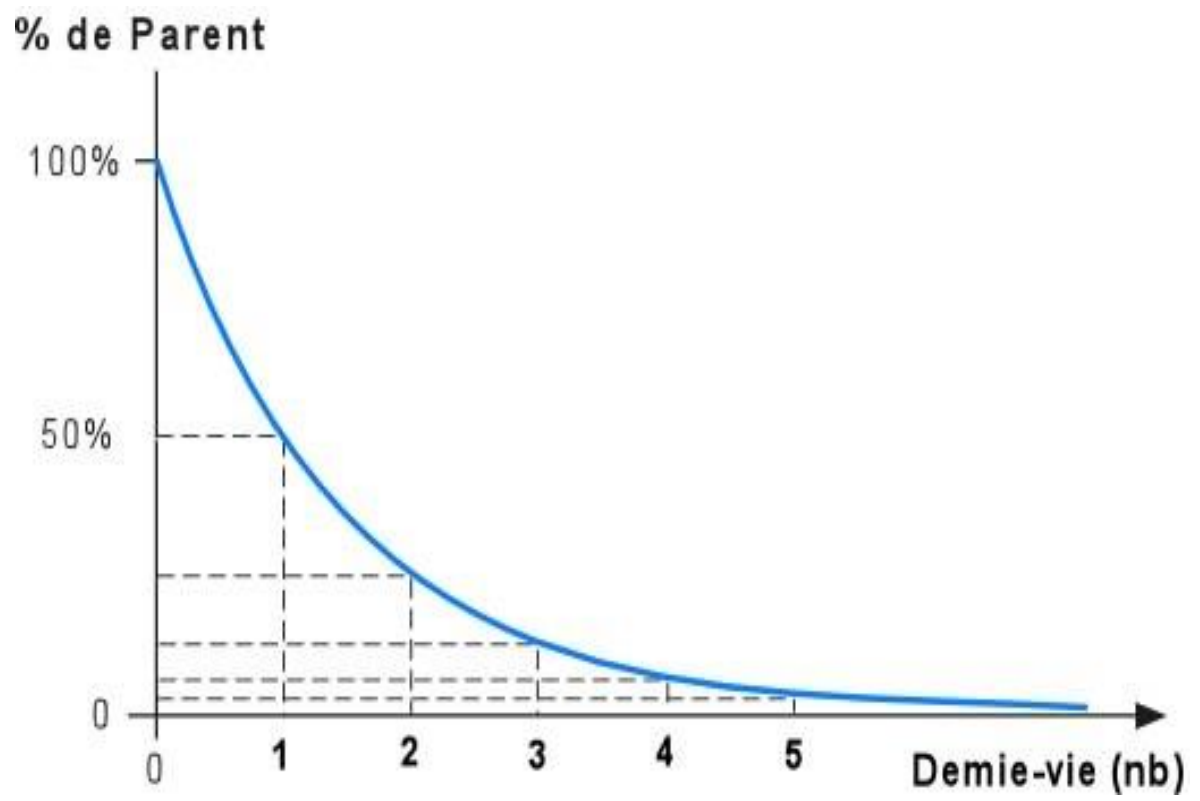


Figure 8: graphique d'une réaction de désintégration radioactive