

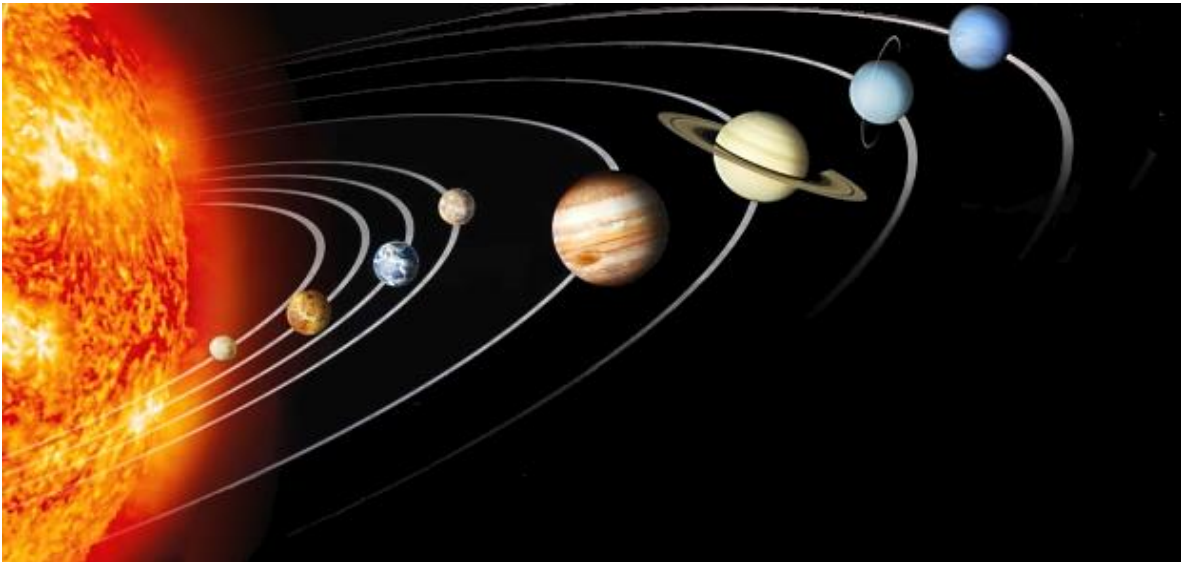
UNIVERSITÉ LIBANAISE  
Faculté des Sciences  
Section (1) Hadeth



## Cours: ENVI 100 Français

*GEOSPHERE- PLANETE TERRE*

*Première année Biologie- deuxième semestre 2011/2012*



Préparé par Dr. Samir Zaatiti

### REFERENCES:

- *ENCYCLOPEDIE ENCARTA /French/ English 2008.*
- *nre-serveur.univ-lyon1.fr%2Fgeosciences/*
- *[www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/](http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/) planète terre.*

## GEOSPHERE

Notre planète, la Terre est **active**. Les témoignages en sont nombreux : le sol tremble, des volcans entrent en éruption, la boussole s'oriente vers le Nord magnétique, les rivières transportent de l'eau douce et des particules vers les océans, les tornades sont fréquentes en Floride, etc....

Comme pour toute machine, de même que pour tout système vivant, **comprendre la dynamique de l'activité du globe terrestre nécessite d'en identifier et évaluer les sources d'énergie, de comprendre les mécanismes de transfert ainsi que les modalités de dissipation de cette énergie**

Ainsi dans un premier temps, vous étudierez l'enveloppe terrestre qui confère sans aucun doute son unicité à la Terre : la biosphère.

Notre planète singulière peut être comparée à ses voisins du **systeme solaire**. Alors, il vous faudra aussi considérer que la Terre est une planète dans l'Univers, et nous reconstituerons ensemble l'histoire de la Terre et de ses éléments constitutifs depuis les débuts de l'Univers, il y a 15 Ga, jusqu'aujourd'hui

En allant à la découverte de notre planète comme nous sommes capables de le faire pour n'importe quelle planète du système solaire, le visage actuel Terre apparaît nettement comme une succession d'enveloppes concentriques d'autant plus difficiles à observer qu'elles sont profondes. Qu'il s'agisse de l'atmosphère, de l'hydrosphère, c'est à dire des enveloppes externes fluides de la Terre ou bien de la 'géosphère' interne, ces trois principales enveloppes sont manifestement hétérogènes à la fois dans les dimensions verticales et horizontales. Il en résulte que notre planète est passionnante par son originalité : elle présente une forte activité interne, ainsi qu'une activité externe intense liée à la présence de l'eau et des organismes vivants.

Mais il est peu probable que le visage actuel de la Terre soit celui de toujours. La Terre est maintenant âgée de 4,5 Ga (milliards d'années). De cette longue histoire, il ne reste que quelques images fragmentaires et sporadiques, à partir desquelles il nous faut dater les phénomènes. La Géologie est donc aussi une histoire.

Un outil indispensable à l'étude de notre 'vieille' planète est bien sur la chronologie. Dans quel ordre se sont succédé les phénomènes ? Combien de temps ont-ils duré ? Voilà autant de questions qui ne trouveront pas de réponse sans notion de **chronologie**.

Ensuite, pour comprendre comment sont agencés les différents composants de la planète à la surface du globe, il est indispensable de bien comprendre les représentations 'à plat' que l'on se donne d'une **géométrie** tridimensionnelle. Il s'agit donc là d'acquérir un outil, indispensable à la géologie qui est intrinsèquement une science tridimensionnelle. Cet outil vous sera aussi très utile dans de nombreux domaines scientifiques.

A présent que vous disposez de ces nouveaux outils, vous allez pouvoir partir à la découverte de la dynamique de l'atmosphère et de l'océan, que l'on appelle encore **géodynamique externe**. Vous voyagez ensuite vers le centre de la Terre situé environ à 6370 km sous vos pieds, en étudiant les grands traits de la **géodynamique interne**.

## L'UNIVERS

L'Univers (ou cosmos) regroupe tout ce que nous connaissons et qui nous entoure : les galaxies, les étoiles, les planètes, les nébuleuses, les supernovae, les pulsars, les trous noirs, les quasars, les poussières interstellaires, etc. Parmi tous ces objets, les étoiles représentent la quasi-totalité de la masse visible de l'Univers. Mais **90 % du contenu de l'Univers est encore sous forme inconnue, appelée matière noire** (ou matière sombre).

**Toute la matière du cosmos est regroupée en galaxies.** L'Univers possède ainsi **plusieurs milliards de galaxies** qui tournent sur elles-mêmes. Notre galaxie, la **Voie Lactée**, regroupe le Soleil et toutes les étoiles visibles à l'œil nu depuis la Terre.



### **Galaxies lointaines**

En janvier 1996, des astronomes montrèrent que l'Univers contient cinq fois plus de galaxies que ce que l'on croyait auparavant. Cette image composite de photographies prises par le télescope spatial Hubble les conforta dans cette conclusion. Couvrant un minuscule point noir dans le ciel, l'image représente des objets extrêmement pâles que les scientifiques ont pu interpréter. UPI/NASA/REUTERS  
Microsoft ® Encarta ® 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

**Galaxie** = vaste ensemble formé par des milliards d'étoiles et par des gaz et des poussières interstellaires dont la cohésion est maintenue par la gravitation.



NASA/Liaison Agency

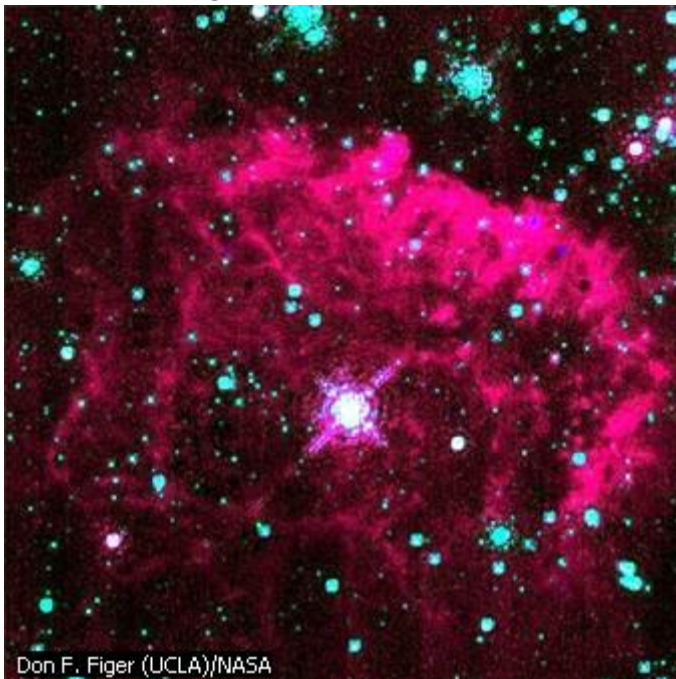
#### **Galaxie M 100**

Cette photo a été prise en décembre 1993 par le télescope spatial Hubble. Cette galaxie spirale est située entre 35 millions et 80 millions d'années-lumière de la Terre.

NASA/Liaison Agency

Microsoft ® Encarta ® 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

**Etoile** = corps céleste brillant constitué d'une énorme masse gazeuse produisant chaleur et énergie.



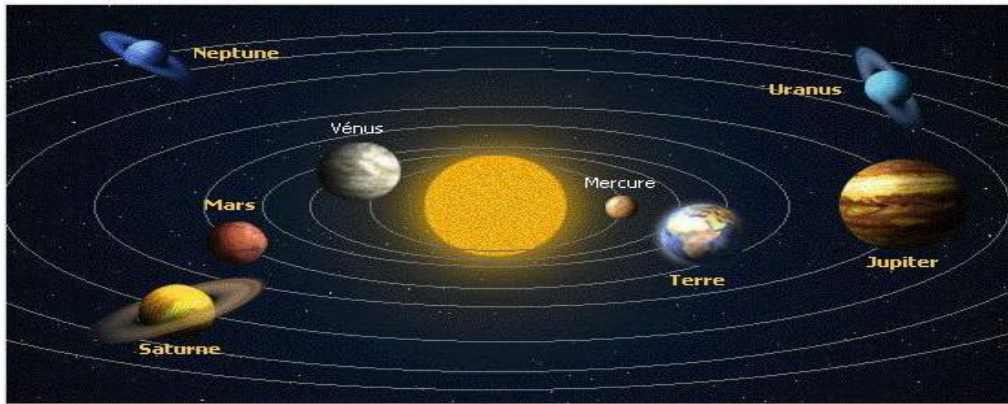
Don F. Figer (UCLA)/NASA

#### **Pistol Star**

En octobre 1997, le télescope spatial Hubble détecte dans l'infrarouge une étoile située en direction du centre de la Voie lactée et qui serait 10 millions de fois plus brillante que le Soleil. Selon certains astronomes, cette étoile, baptisée Pistol Star, est l'étoile la plus massive jamais découverte (plus de 100 fois la masse du Soleil) ; toutefois, d'autres astronomes estiment qu'il ne s'agit pas d'une étoile unique.



**Planète** = corps céleste dépourvu de lumière propre, qui gravite autour du Soleil.  
la Terre est une planète.



Cliquez sur les planètes pour découvrir leurs principaux satellites naturels.

#### Principaux satellites naturels des planètes du Système solaire

Cette interactivité présente les principales caractéristiques des satellites naturels (ou lunes) des planètes du Système solaire. On notera l'absence de Pluton, reclassée en « planète naine » par l'Union astronomique internationale (UAI) en août 2006.

Pour les planètes géantes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) qui possèdent de très nombreux satellites naturels, seuls les plus grands sont exposés ici.

On remarquera également que les planètes Mercure et Vénus ne possèdent pas de lunes.

Encyclopédie Encarta

© Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

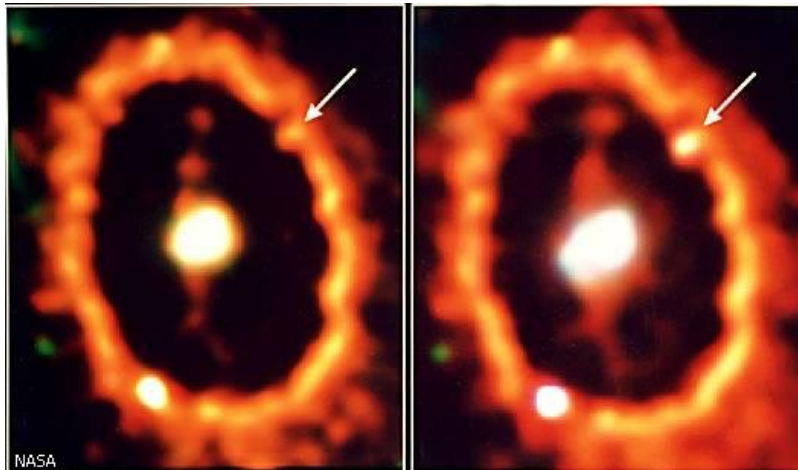
**Nébuleuse** = immense corps céleste aux contours imprécis et à l'aspect nuageux, constitué de gaz et de poussières interstellaires.



### Nébuleuse de l'Aigle

Nuage interstellaire, la nébuleuse de l'Aigle comprend d'imposantes colonnes de gaz et de poussière qui contiennent des protoétoiles (cercles rouges). Ces étoiles en formation ont été photographiées par le télescope spatial Hubble. Les images, publiées en novembre 1995, fournissent aux astronomes de nouvelles informations sur le processus de formation des étoiles.

**Supernova** =étoile dans la phase explosive de sa vie, marquée par une forte augmentation de sa luminosité et par une profonde altération.



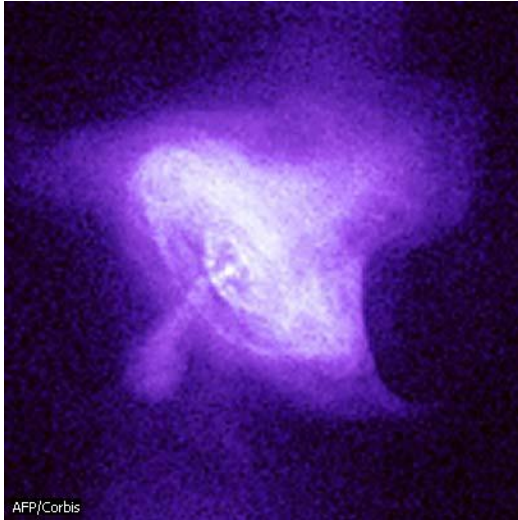
NASA

Microsoft ® Encarta ® 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

### Supernova 1987 A

La plus grande des supernovae visibles de la Terre depuis l'invention du télescope, la supernova 1987 A, est apparue dans le Grand Nuage de Magellan en 1987. Depuis lors, les astronomes ont suivi le déroulement de l'explosion. En février 1998, le télescope spatial Hubble a pris ces images montrant un début d'embrasement à l'intérieur de l'un des anneaux de gaz qui se sont séparés de l'étoile avant l'apparition de la supernova. Cet embrasement indique que le souffle de l'explosion est en train de rattraper le gaz précédemment évacué, le chauffant à une forte température, ce qui provoque une forte émission de rayons X.

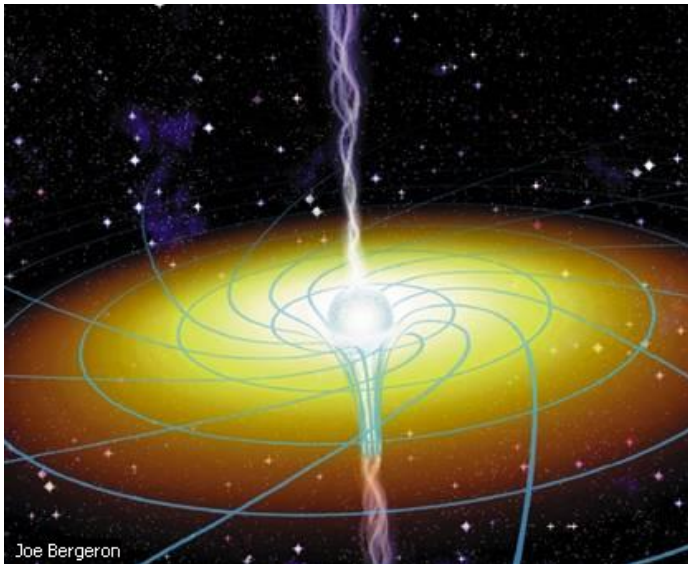
**les pulsars** = étoile à neutrons en rotation rapide et source de rayonnement électromagnétique intense émis dans la gamme des longueurs d'onde radio et caractérisé par une modulation périodique de l'émission.



#### **Pulsar du Crabe**

Cette photographie, prise par l'observatoire spatial Chandra X-ray Observatory le 28 septembre 1999, confirme l'existence d'un pulsar au cœur de la nébuleuse du Crabe, vestige d'une explosion de supernova observée pour la première fois depuis la Terre en 1054 par des astronomes chinois. Les électrons piégés et accélérés par le champ magnétique du pulsar émettent un intense faisceau conique de rayonnement radio, appelé rayonnement synchrotron, orienté selon l'axe dipolaire du champ magnétique.

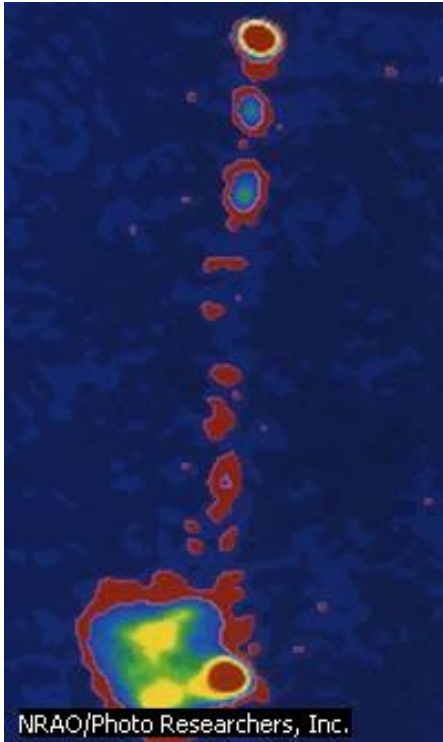
**le trou noir** = région théorique de l'espace dotée d'un champ gravitationnel si fort qu'aucun corps ni aucun rayonnement ne peuvent s'en échapper.



#### **Modélisation d'un trou noir**

Les trous noirs sont des régions de l'espace où règne une force d'attraction (la force de gravitation) tellement forte qu'aucun objet ni aucune lumière ne peut s'en échapper. On les représente généralement sous la forme de gigantesques siphons, capables de déformer l'espace-temps autour d'eux (les lignes bleues sur l'illustration).

**le quasar** = astre très lumineux semblable à une étoile, dont le spectre d'émission présente un fort décalage vers le rouge.



### Rayonnement radio d'un quasar

Les quasars sont des radiosources dites quasi stellaires, caractérisées par un fort décalage vers le rouge dans leur spectre d'émission. Cette image codée en fausses couleurs, produite par le radiotélescope Very Large Array situé au Nouveau-Mexique, fait apparaître les zones du rayonnement radio du quasar qui ont la même intensité. Les lobes radio observés (en rouge), formant une structure longiligne, résultent de l'éjection de matière issue du noyau du quasar (en rouge, en haut de l'image). Cette intense émission d'ondes radio, similaire à celle des radiogalaxies, serait due à la présence d'un trou noir au centre du quasar.

**les poussières interstellaires** = ensemble de petits grains de matière dispersés dans l'espace entre les étoiles.

### QUEL EST L'ÂGE DE L'UNIVERS ?

La réponse à cette question dépend du modèle cosmologique utilisé pour décrire l'histoire de l'Univers :

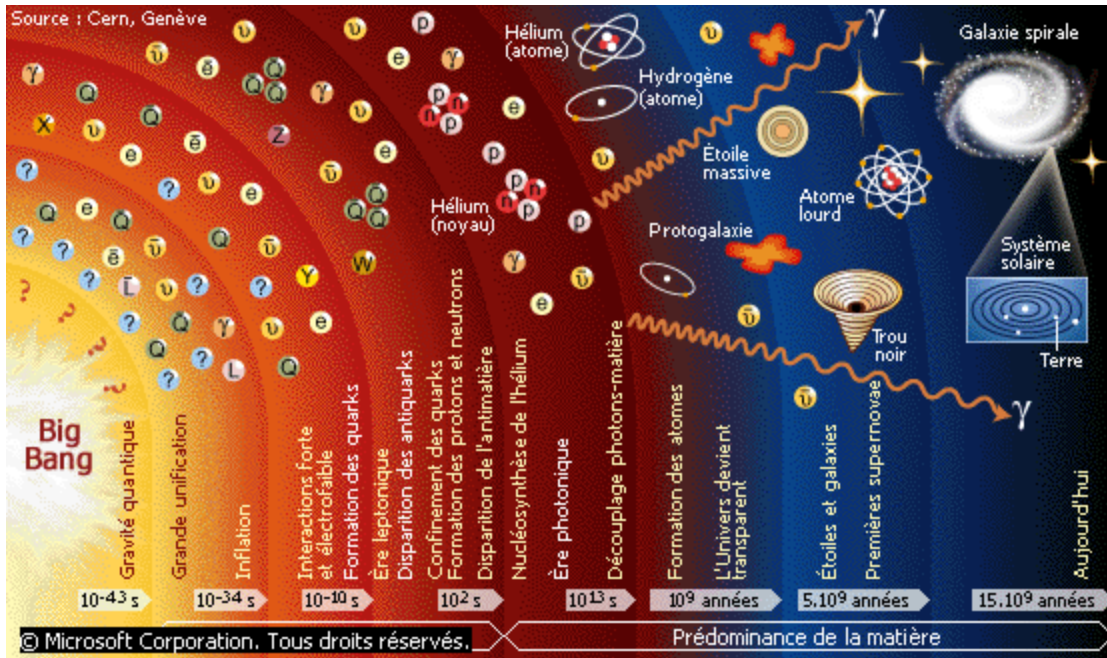
- Pour les partisans de la théorie du Big bang (théorie considérée comme officielle par la majorité des scientifiques), l'Univers a **environ 15 milliards d'années** ; cet âge correspond à l'âge des plus vieilles étoiles observées dans l'Univers ;
- Pour d'autres cosmologistes (comme l'éminent Fred Hoyle), qui rejettent l'idée d'un commencement de l'Univers (idée trop séduisante pour les esprits religieux), l'Univers a un **âge infini** puisqu'il a toujours existé.

### COMMENT S'EST FORMÉ L'UNIVERS ?

Les scientifiques croient qu'une explosion énorme s'est produite depuis 15 milliards d'année. Connue sous le nom de Big bang, cette explosion est vraisemblablement le début de l'univers. À son début, l'univers était si chaud que rien ne pourrait se former, pas même les minuscules particules de la matière.

Dans les premières secondes après l'explosion, le nouvel univers subit une expansion dans toutes les directions, d'une taille plus petite qu'un atome à une grande masse chaude plus grande qu'une galaxie.





## Scénario du Big bang

Selon la théorie du Big bang, théorie acceptée par la majorité des cosmologistes, l'Univers serait né il y a environ 15 milliards d'années dans une explosion inimaginable, appelée Big bang. De ce qu'il y avait avant cette explosion et immédiatement après, très exactement 10-43 s, les théories actuelles, nombreuses et controversées, ne permettent pas encore de le dire. Mais de cet instant (10-43 s) à nos jours, la théorie du Big bang, confortée par les récentes observations, notamment celle du rayonnement de fond du ciel par le satellite COBE, permet de décrire les grandes étapes de l'évolution de l'Univers.

Comme l'univers a augmenté de volume, les températures baissent. Trois minutes après l'explosion, les premières particules de la matière commencent à se former, y compris des protons, des neutrons, et des électrons.

Après 300.000 ans, l'univers en expansion devient assez froid pour permettre à des particules de matière de se joindre ensemble pour former les premiers atomes. Ces atomes deviendraient les blocs constitutifs de toutes les matières.

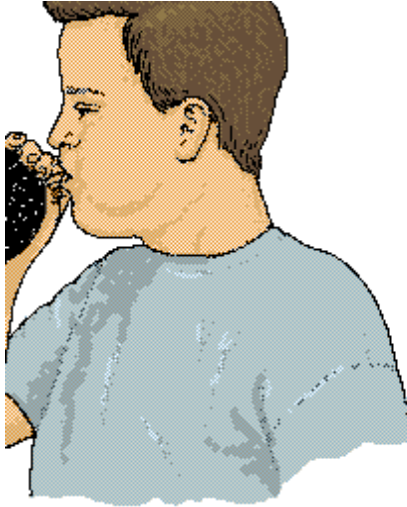
Un milliard d'année après l'explosion, les gaz d'hydrogène commencent à former des blocs. Ces blocs sont venus ensemble pour faire des étoiles et des galaxies.

Pendant que les galaxies se groupaient ensemble, les étoiles meurent en explosions qui ont poussé la matière dans l'espace. Cette matière a par la suite formé la terre et toutes les planètes dans notre système solaire. Environ 10 milliards d'ans après le Big bang, la vie commence à apparaître sur terre. Aujourd'hui, plus de 15 milliards d'année après le Big bang, l'univers continue son expansion.

## QU'EST-CE QUE L'EXPANSION DE L'UNIVERS ?

En 1929, l'astronome américain Edwin Hubble découvre que les galaxies s'éloignent les unes des autres : ce qui prouve que l'Univers est en expansion. Aucun scientifique (même les opposants à la théorie du Big bang) ne rejette cette observation qui est souvent présentée comme l'une des preuves de la théorie du Big bang.

Les scientifiques estiment aujourd'hui que **l'Univers est en expansion avec la forme d'un ballon de football de 15 milliards d'années-lumière de diamètre**. Plus on remonte dans le temps, plus l'Univers est jeune, et plus il y a d'événements violents (naissance d'étoiles, collisions de galaxies, etc.).



Dessinez des points représentant les galaxies de l'Univers sur un ballon.



Au fur et à mesure que vous gonflez le ballon les «galaxies» s'éloignent les unes des autres.

### L'expansion de l'Univers (simulation)

La loi de Hubble qui régit l'expansion de l'Univers s'exprime par la relation :  $v = H \times d$ , où  $v$  est la vitesse d'éloignement d'une galaxie donnée par rapport à la nôtre ;  $d$  est la distance qui nous sépare de cette galaxie, et  $H$  la constante de Hubble (dont la valeur n'est toujours pas connue avec certitude). De manière générale, plus les galaxies sont éloignées les unes des autres, plus elles s'éloignent rapidement.

### QUEL EST L'AVENIR DE L'UNIVERS ?

Les cosmologistes proposent deux théories sur l'avenir de l'Univers :

- la théorie du **système ouvert**, elle considère que les étoiles de durée de vie limitée vont former des trous noirs ; ces trous noirs deviendront de plus en plus nombreux, et finiront par englober toute la matière restante ; dans ce cas, l'expansion de l'Univers continuera sans fin.
- la théorie du **système fermé**, qui considère que l'expansion de l'Univers va ralentir, car elle s'oppose à la loi de la gravitation ; l'expansion de l'Univers ne serait donc pas infinie ; l'Univers s'immobilisera et se contractera dans un volume si petit que cela déclenchera un nouveau Big bang, pour recréer ensuite un nouvel Univers avec une nouvelle expansion.

## LES GALAXIES

Toute la matière du cosmos est regroupée en galaxies. L'Univers possède ainsi plusieurs milliards de galaxies qui tournent sur elles-mêmes. Notre galaxie la Voie Lactée, regroupe le Soleil et toutes les étoiles visibles à l'œil nu depuis la Terre.

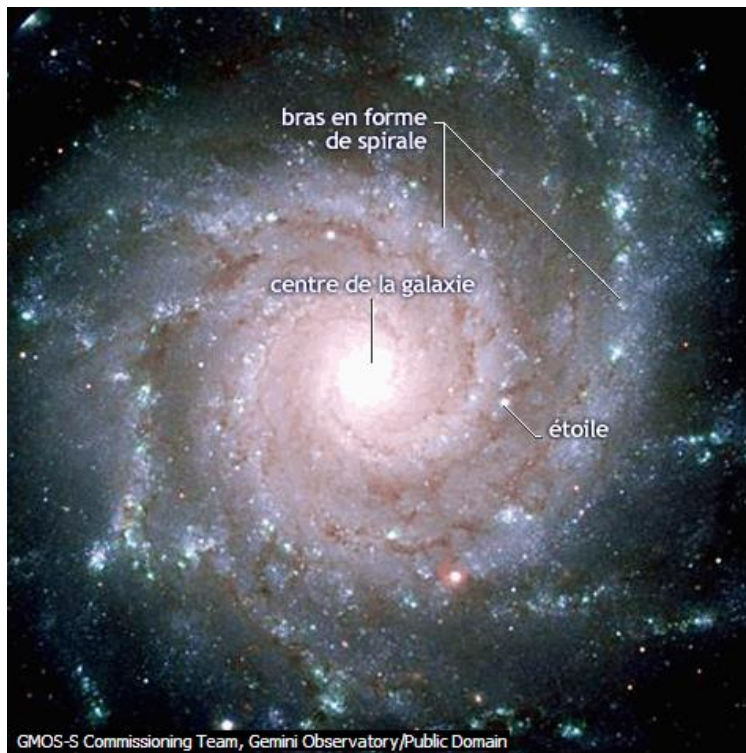
### QUELLE EST LA COMPOSITION D'UNE GALAXIE ?

Les galaxies sont des régions de l'Univers où se trouvent plusieurs milliards de corps célestes : des étoiles, des planètes, des comètes, des astéroïdes, des gaz (hydrogène, azote, etc.), des poussières interstellaires, etc. L'ensemble de ces corps tourne autour du centre de leur galaxie en plusieurs centaines de millions d'années. Mais la plus grande partie de la galaxie est constituée de matière si peu lumineuse qu'elle n'est tout simplement pas visible : cette matière est d'ailleurs appelée matière noire (ou matière sombre).

### QUELS SONT LES TYPES DE GALAXIE ?

Les galaxies sont classées en trois catégories :

- Les galaxies **elliptiques**, qui se forment à partir d'un grand nombre d'étoiles, avec un noyau dense et brillant ; elles contiennent peu d'étoiles jeunes, mais beaucoup de vieilles étoiles, de gaz et de poussières ;
- Les galaxies **spirales**, qui sont des disques aplatis avec de longs bras en forme de spirale (comme la Voie lactée) ; elles contiennent beaucoup d'étoiles jeunes (brillantes), de gaz et de poussières, mais peu de vieilles étoiles ; les étoiles se déplacent sur des orbites circulaires avec une vitesse qui augmente avec la distance au centre de la galaxie : par exemple, le Soleil tourne à une vitesse de 250 km/s à une distance de 27 000 années-lumière par rapport au centre de la galaxie ;
- Les galaxies **irrégulières**, qui sont composées de nombreuses étoiles jeunes et d'une grande quantité de matière interstellaire ; ces galaxies sont situées près des grandes galaxies, qui les perturbent et modifient leur aspect.



### Les galaxies spirales

Les galaxies spirales sont des disques aplatis qui contiennent des milliards d'étoiles, du gaz, des poussières et des trous noirs (région de l'espace qui possède une force d'attraction si forte que même la lumière ne peut en sortir). Toutes ces étoiles et cette matière interstellaire tournent autour du centre de la galaxie.



## OÙ SE SITUENT LES GALAXIES DANS L'UNIVERS ?

Les galaxies ne sont pas isolées dans l'Univers : elles appartiennent à de petits groupes de galaxies appelés amas de galaxies. Par exemple, notre galaxie (la Voie lactée) fait partie d'un amas appelé le Groupe local, qui regroupe une trentaine d'autres galaxies. L'amas galactique le plus proche du Groupe local est l'amas de la Vierge.

Les amas de galaxies ne sont pas uniformément répartis dans l'Univers, mais disposés en longues bandes (ou filaments) autour de grands vides : autrement dit, les amas de galaxies se regroupent pour former des structures encore plus grandes, appelées les superamas de galaxies.

## COMMENT OBSERVER ET ÉTUDIER LES GALAXIES ?

Il est difficile d'étudier les galaxies car elles sont très éloignées de la Terre. Par exemple, la galaxie d'Andromède est la seule galaxie observable à l'œil nu depuis la Terre. Par conséquent, les astronomes étudient les différents rayonnements (le spectre électromagnétique) émis par la galaxie à l'aide de grands télescopes spécifiques à chaque type de rayonnement. Ils peuvent ainsi déterminer la composition et les mouvements des étoiles individuelles (domaine des ondes radio), les caractéristiques des poussières chaudes du noyau (rayonnement infrarouge), les halos galactiques (rayons X), l'évolution des jeunes étoiles (rayonnement ultraviolet), ou la formation des trous noirs (rayons X). L'observation de notre galaxie (la Voie lactée) permet d'obtenir de précieuses informations sur le « fonctionnement » d'une galaxie.



NASA/Science Source/Photo Researchers, Inc.

### Galaxie d'Andromède

La galaxie d'Andromède est une galaxie en forme de spirale, semblable à la Voie lactée. C'est le corps céleste le plus lointain que l'on puisse observer à l'œil nu. Elle est située dans la constellation d'Andromède.

## QUELLES SONT LES GRANDES ÉTAPES DE L'OBSERVATION DES GALAXIES ?

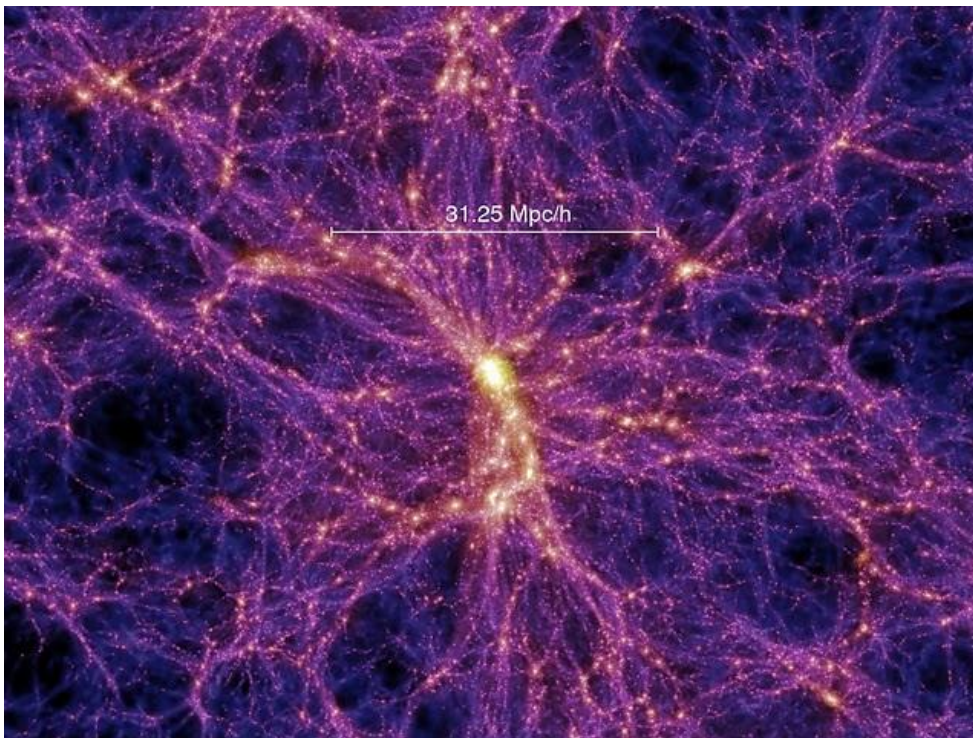
La première description d'une galaxie (celle d'Andromède) est faite par l'astronome perse Al-Sufi en 905. En 1780, l'astronome français Charles Messier publie un catalogue des 32 premières galaxies, dont la galaxie d'Andromède (M31). Au XIX<sup>e</sup> siècle, des milliers de galaxies sont identifiées par William Herschel, sa sœur Caroline et son fils John. L'astronome américain Edwin Hubble observe enfin en 1928 que les galaxies s'éloignent les unes des autres dans l'Univers. Cependant, les scientifiques ne savent pas actuellement si l'expansion de l'Univers (et donc l'éloignement des galaxies) se poursuivra dans le futur.





### **Galaxie M 100**

Cette photo a été prise en décembre 1993 par le télescope spatial Hubble. Cette galaxie spirale est située entre 35 millions et 80 millions d'années-lumière de la Terre.



### **Structure filamenteuse de l'univers**

Il faut s'imaginer la structure de l'Univers en forme de toile d'araignée où la gravité ordonne la matière le long de fins filaments (une sorte de pont de gaz reliant les amas de galaxies, La température du gaz est comprise entre 10 000 et un million de degrés). Les régions les plus denses (les plus lumineuses) sont reliées entre elles par de longs filaments. Elles donneront naissance aux amas de galaxies.

## LA VOIE LACTÉE

La Voie lactée est une galaxie. Il existe des milliards de galaxies dans l'Univers, mais cette galaxie, qui comprend le Système solaire et donc la Terre, est spéciale : c'est dans cette galaxie que nous vivons. Notre galaxie, la Voie lactée, est une galaxie spirale. Elle a un diamètre de 100 000 années-lumière, c'est-à-dire que la lumière (qui se déplace dans le vide à la vitesse de 300 000 km/s) met 100 000 années pour aller d'un bout à l'autre de la galaxie. Notre Système solaire est situé à la périphérie de la Voie lactée, dans un bras spiral, à quelques 26 000 années-lumière du centre de notre galaxie. Il tourne autour du noyau de la Voie lactée à la vitesse de 270 km/s et effectue un tour complet en 200 millions d'années. Le Soleil, situé au centre du Système solaire, si essentiel pour nous puisqu'il est la source du développement de la vie sur Terre, est en fait une étoile très banale non seulement dans notre galaxie, mais également dans toutes les galaxies de l'Univers.



### Voie lactée

L'étude des galaxies est difficile du fait de leur éloignement. En revanche, on connaît relativement bien notre galaxie, la Voie lactée. Sa nature a été révélée, pour la première fois, par Galilée en 1610. Peu à peu, on a découvert qu'elle est aplatie en forme de disque regroupant environ 100 milliards d'étoiles. Des bras s'enroulent en spirale autour du centre.

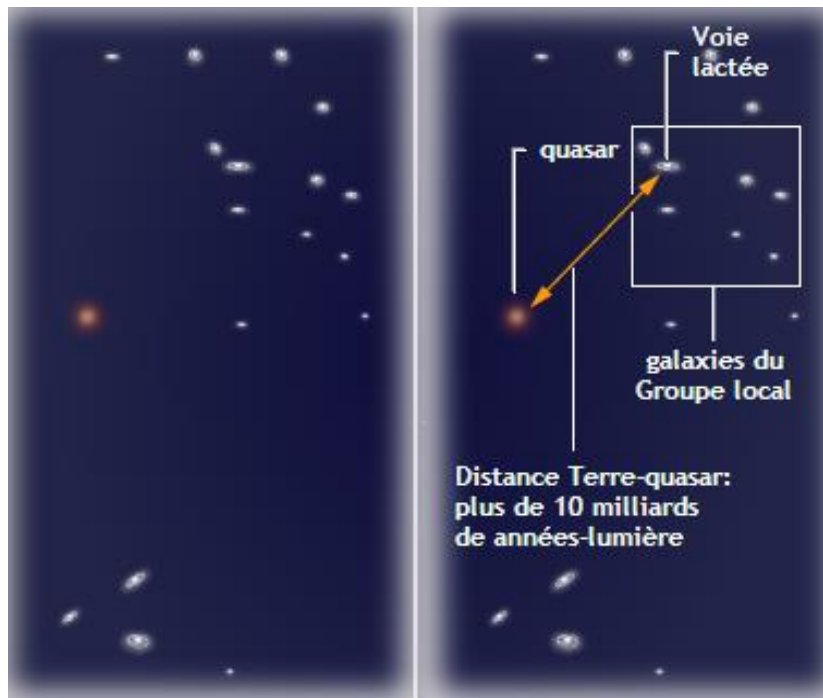
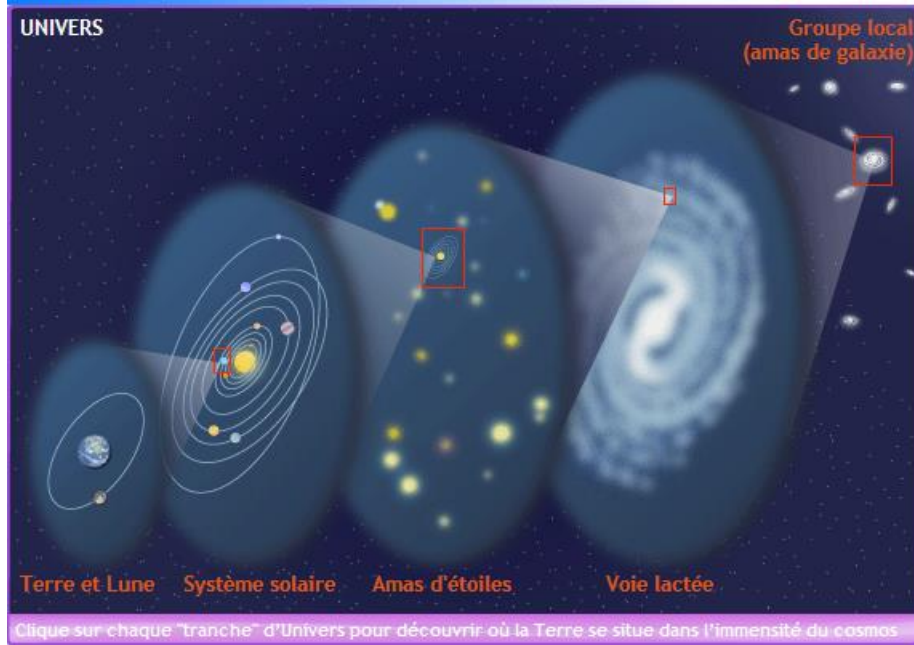
### OÙ SE TROUVE LA VOIE LACTÉE DANS L'UNIVERS ?

On ne sait pas si la Voie lactée est située à gauche ou à droite ou vers le centre de l'Univers, car on ne connaît toujours pas la forme et l'étendue de l'Univers. Ce que l'on sait, c'est que la Voie lactée se trouve dans un amas de galaxies appelé « **Groupe local** ». Cet amas de galaxies regroupe une vingtaine de galaxies, dont la galaxie d'Andromède, la galaxie Triangulum (M33) et la galaxie du Grand Nuage de Magellan.

L'amas de galaxies le plus proche du Groupe local est celui de la Vierge, situé à 50 millions d'années-lumière de nous.

**Où sommes-nous dans l'Univers ?**

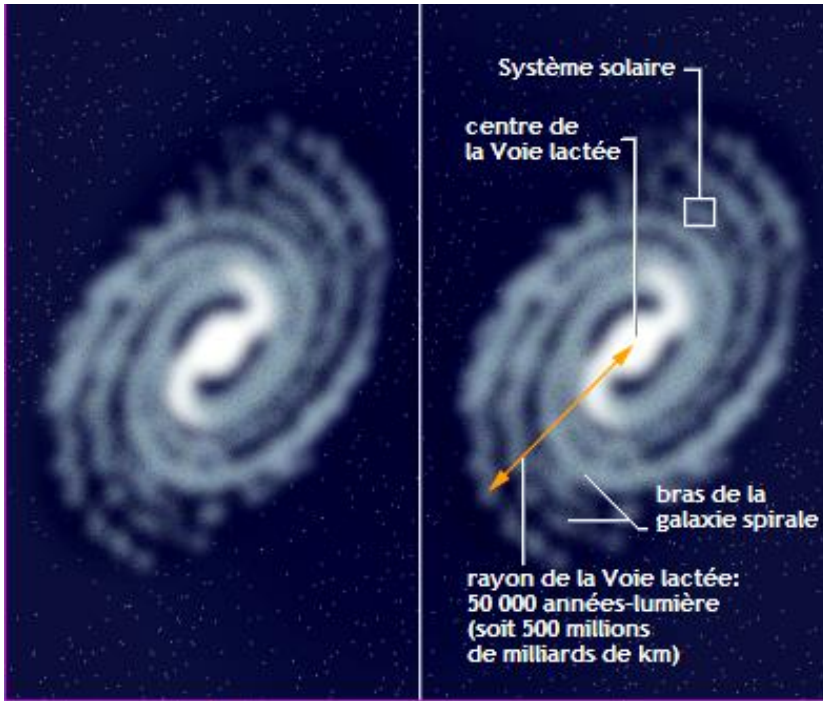
La Terre se situe en fait sur les bords de la Voie lactée (dans un bras spiral), et notre galaxie fait partie d'un petit groupe de galaxies (appelé Groupe local) parmi d'autres...



**Groupe local (Amas de Galaxies)**



## La Voie lactée



La Voie lactée est une galaxie spirale qui s'étend sur près de 100 000 années-lumière (soit 1 milliard de milliards de km). Le Système solaire est situé à la périphérie de la Voie lactée, dans un bras spiral, à environ 26 000 années-lumière du centre de notre galaxie (soit à peu près aux deux tiers du rayon, à partir du centre).



**Amas d'étoiles** : Le Soleil n'est qu'une banale étoile parmi les 100 autres milliards d'étoiles que compte la Voie lactée. La plupart des étoiles d'une galaxie sont rassemblées en groupes de plusieurs dizaines, centaines ou millions d'étoiles : ces groupes sont appelés des amas stellaires (ou amas d'étoiles). L'étoile la plus proche du Soleil (autrement dit la deuxième étoile la plus proche de la Terre) est Proxima du Centaure. Elle se situe à 4,23 années-lumière du Soleil (soit environ 40 000 milliards de km).



Les distances entre les différents objets célestes étant considérables, les astronomes ont défini une unité particulière : l'année-lumière (de symbole al). Une année-lumière correspond à la distance parcourue par la lumière en une année. Comme la lumière se déplace dans le vide à la vitesse d'environ 300 000 km/s, une année-lumière correspond à un peu moins de 10 000 milliards de kilomètres.

### **QUELLE EST LA STRUCTURE DE LA VOIE LACTÉE ?**

La Voie lactée est une grande **galaxie spirale** : au centre se trouve un noyau brillant appelé bulbe, d'où partent des bras spiraux composés d'étoiles, de nébuleuses et de poussières interstellaires. Vue par la tranche, elle ressemble à un **disque aplati**, avec un renflement au centre.

**La Voie lactée comprend plus de 100 milliards d'étoiles** (étoiles bleues brillantes, étoiles géantes rouges), des poussières et des gaz interstellaires.

En 2002, les astronomes ont démontré **l'existence d'un gigantesque trou noir au centre de la Voie lactée** ; un **deuxième trou noir**, moins massif (seulement 1 300 fois la masse du Soleil), situé à proximité du premier, est apparu dans les lignes de visée des observatoires terrestres et spatiaux.

Par ailleurs, la Voie lactée est enveloppée par un nuage étendu d'hydrogène gazeux. Ce nuage est lui-même entouré par un **halo** deux fois plus grand que le disque galactique, qui contient de nombreux amas d'étoiles, situés principalement au-dessus ou en dessous du disque. Ce halo (comme le centre de la Voie lactée) n'est pas directement visible en raison de la poussière interstellaire.

### **QUELS SONT LES MOUVEMENTS DE LA VOIE LACTÉE ?**

**La Voie lactée tourne dans le sens des aiguilles d'une montre si on la regarde du dessus** (du pôle galactique Nord). La période de rotation (c'est-à-dire le temps mis par un objet pour faire un tour complet de galaxie) est d'autant plus longue que la distance au centre de la galaxie est grande. Le Soleil est situé dans l'un des bras de la Voie lactée, à environ 26 000 années-lumière du centre. Au voisinage du Système solaire, la période de rotation est supérieure à 200 millions d'années et la vitesse du Système solaire s'élève à environ 270 km/s.

### **QUAND ET COMMENT VOIR LA VOIE LACTÉE DEPUIS LA TERRE ?**

La Voie lactée est visible à l'œil nu depuis la Terre sous la forme d'une **bande lumineuse blanche traversant le ciel**. C'est **Galilée** qui a découvert et décrypté en 1610 l'origine de cette large traînée laiteuse : son aspect vaporeux résulte de la présence d'une multitude d'étoiles. Ces étoiles sont en revanche trop éloignées de la Terre pour être visibles individuellement à l'œil nu. Celles que nous discernons séparément dans le ciel sont suffisamment proches de nous pour être perçues comme un astre isolé de ses voisins.

Dans l'hémisphère Nord, on a le plus de chance de voir la Voie lactée durant les nuits d'été sans nuage et sans Lune. Les astronomes observent quant à eux la Voie lactée à l'aide de puissants télescopes terrestres et spatiaux, dans toutes les gammes de fréquences (ondes radio, micro-ondes, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et gamma).

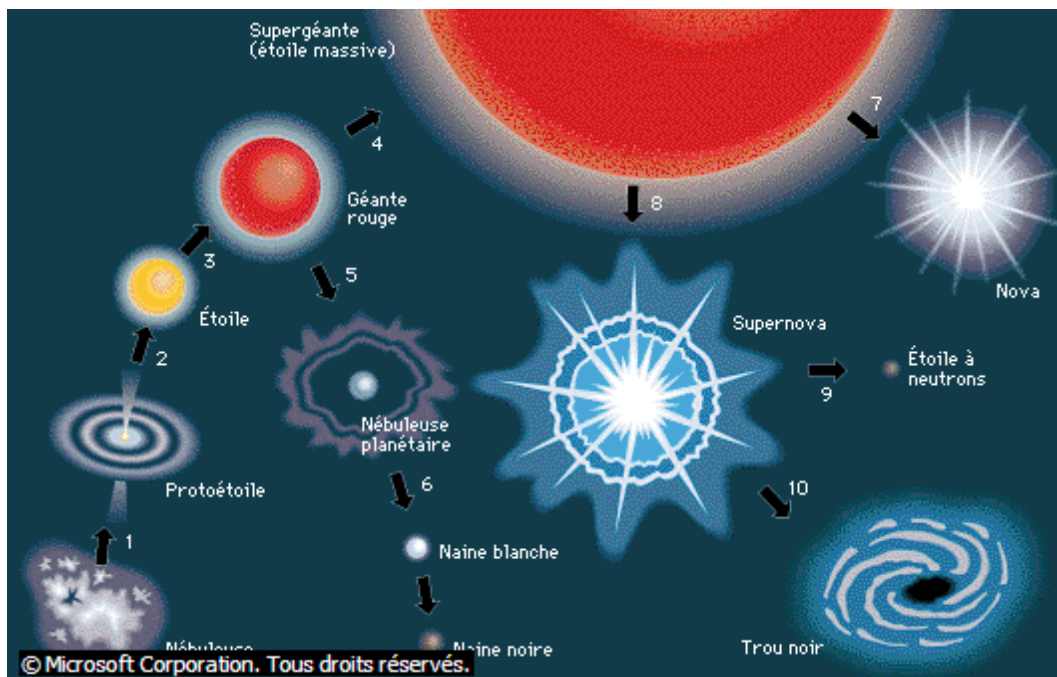
## LES ÉTOILES

Les étoiles sont de gigantesques boules de gaz, très éloignées de la Terre. Elles rayonnent et créent leur propre énergie lumineuse. C'est ce qui fait leur différence avec les autres corps célestes (planètes, lunes, astéroïdes) qui ne font que réfléchir la lumière des étoiles qui les éclairent.

## VIE ET MORT DES ÉTOILES

À l'échelle humaine, les étoiles paraissent éternelles. Pourtant, une étoile a un début et une fin, une naissance et une mort. Mais la vie d'une étoile se réalise en un temps très long : des centaines de milliers d'années pour les étoiles très massives, des millions ou des milliards d'années pour les étoiles peu massives.

Les étoiles naissent dans les galaxies, dans les zones gazeuses entre les étoiles, au sein de nuages de molécules très froids (proche du zéro absolu, fixé à  $-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ces nuages sont composés en grande majorité d'hydrogène et d'hélium, avec de toutes petites quantités d'atomes plus lourds (carbone, oxygène, azote, etc.). Ils sont si peu denses que, sur la Terre, ils seraient en fait considérés comme analogues au vide. Cependant, il suffit d'une instabilité pour qu'ils s'effondrent sous leur propre poids et donnent naissance à des boules concentrées de matière gazeuse. Ces boules s'échauffent progressivement, jusqu'à ce que la température en leur centre atteigne 15 millions de degrés. Cette température permet d'amorcer des réactions nucléaires (réactions de fusion thermonucléaire) : ainsi naissent les étoiles.



La première phase de vie d'une étoile est celle de la fusion thermonucléaire de l'hydrogène en hélium : cette phase peut être « très courte » (plusieurs centaines de milliers d'années) si l'étoile est très massive, ou beaucoup plus longue (plusieurs milliards d'années) pour les étoiles semblables au Soleil.

À la suite de cette première phase, une série d'étapes nucléaires se succèdent (fusion de l'hélium en carbone, fusion du carbone en oxygène...) en fonction de la masse des étoiles, car c'est la masse de l'étoile qui détermine la valeur de sa température centrale. En effet, la température au cœur de l'étoile doit être de plus en plus élevée pour que se réalisent les fusions thermonucléaires d'éléments chimiques de plus en plus lourds.

Entre les phases nucléaires, le cœur de l'étoile se contracte alors que l'enveloppe externe se dilate : c'est la phase de géante rouge — étape que connaîtra le Soleil dans 5 milliards d'années environ, lorsqu'il aura épuisé en son cœur tout son combustible nucléaire (c'est-à-dire son hydrogène), avant de finir en naine blanche.

**Le destin d'une étoile est donc conditionné par sa masse :**

- **Les étoiles de type solaire (étoiles de masse inférieure à 1,44 fois celle du Soleil)** ne subissent que les premières étapes nucléaires avant de finir leur vie en naines blanches ;
- **Les étoiles massives (étoiles de masse supérieure à 1,44 fois celle du Soleil)** finissent par exploser en supernova — soit complètement en ne laissant rien derrière elles, soient, parfois, en donnant naissance à un objet compact (étoile à neutrons ou trou noir) ;
- **Les étoiles de masse inférieure à 0,06 fois celle du Soleil** n'amorcent quant à elles jamais les réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène et finissent leur vie en naines brunes (petites étoiles avortées qui ne brillent que très faiblement).

## LES ÉTOILES ET LES PLANÈTES

Au tout début de la formation d'une étoile, la condensation centrale est entourée d'un disque de matière (appelé disque d'accrétion) dans lequel se forment éventuellement des planètes. C'est ainsi que les planètes de notre Système solaire se sont formées (elles sont presque toutes contenues dans un plan, dit plan de l'écliptique).



### La constellation du Taureau

Dans la distribution caractéristique en V des étoiles formant l'amas ouvert des Hyades, les Anciens voyaient le profil de la tête d'un Taureau

John Sanford and David Parker/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.



**Antarès** : est un système binaire d'étoiles variables (c'est-à-dire une étoile double de luminosité variable), situé dans la constellation du Scorpion, à une distance de la Terre d'environ 424 années-lumière. L'étoile la plus brillante des deux, Antarès A, est l'étoile la plus lumineuse de toute la constellation. Il s'agit d'une super géante rouge, environ 10 000 fois plus lumineuse que le Soleil. Sa compagne, Antarès B, est une étoile bleue, environ 1 900 fois plus lumineuse que le Soleil. Des études sur la dynamique du système ont permis d'estimer les masses d'Antarès A et B à, respectivement, 10 et 7 fois la masse du Soleil.



### **Le mouvement apparent des étoiles**

Cette photographie, prise avec un temps de pose très long, représente en premier plan la stupéfiante Delicate Arch du parc national des Arches en Utah (États-Unis) et en arrière-plan le mouvement apparent des étoiles dans le ciel, engendré par la rotation de la Terre. Au centre de l'arche, le « sillon » le plus brillant et de plus petit rayon correspond au mouvement apparent de l'étoile Polaire (constellation de la Petite Ourse), située dans le prolongement de l'axe de rotation de la Terre, à proximité du pôle Nord céleste.



## LE SOLEIL

Le Soleil est une **étoile**. C'est **l'astre** autour duquel tourne notre planète, la **Terre**. Le Soleil, la Terre et les huit autres planètes qui tournent également autour du Soleil forment le **Système solaire**.

### Le soleil est une étoile

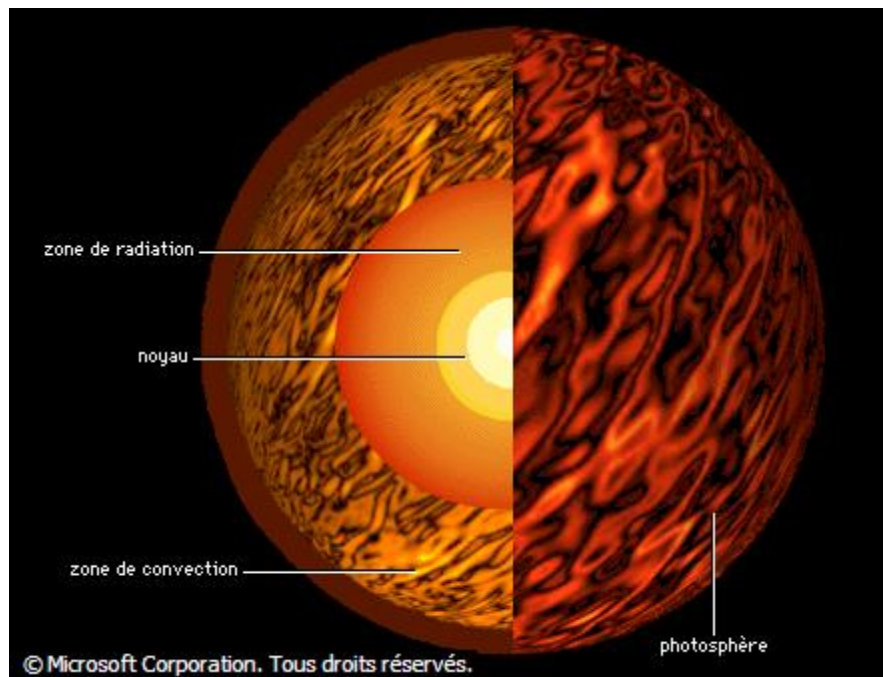
Le Soleil **rayonne** et **produit sa propre énergie** comme un gigantesque réacteur nucléaire : c'est une étoile. C'est de plus **la seule étoile du Système solaire** : tous les autres corps du Système solaire ne sont pas capables de briller par eux-mêmes ; ils ne font que **réfléchir** la lumière du Soleil qui les éclaire.

Le Soleil est **l'étoile la plus proche de la Terre**. La deuxième étoile la plus proche est située en dehors du Système solaire, à 4,23 années-lumière du Soleil. Il s'agit de **Proxima du Centaure** (qui fait partie d'un système de 3 étoiles, avec Alpha du Centaure et Bêta du Centaure).

La lumière issue du Soleil met **un peu plus de 8 minutes** à atteindre la surface de la Terre (celle issue de Proxima, Alpha et Bêta du Centaure met environ 4,2 années à nous atteindre). Le Soleil nous apparaît comme un grand disque lumineux, alors que les autres étoiles sont pour nous de simples points lumineux parce qu'elles sont beaucoup plus lointaines.

En plein jour, la forte luminosité du Soleil ne laisse guère la possibilité de voir les autres étoiles, qui sont pourtant autant de soleils d'autres systèmes planétaires ; il faut attendre que le Soleil soit couché pour déceler tous ces petits points lumineux.

### Naissance et mort programmée du soleil



Le Soleil est né il y a approximativement **4,6 milliards d'années** — soit environ un tiers de l'âge de l'Univers, selon la théorie du Big bang — à la périphérie de notre galaxie, la **Voie Lactée**.

Il s'est formé à partir d'un **nuage de gaz interstellaire** qui s'est effondré sur lui-même (un commencement commun à toutes les étoiles). Il est actuellement quasiment **à mi-vie**. Il s'éteindra vraisemblablement **dans 5 milliards d'années** pour finir en **naine**

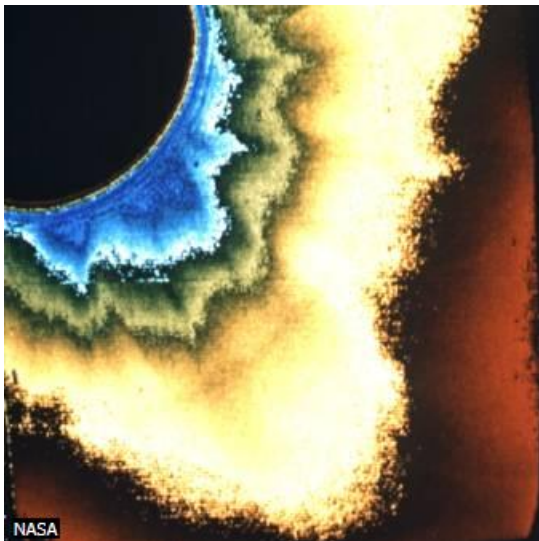
**blanche** (objet compact, dense et peu lumineux), une fois que son cœur aura brûlé tous ses carburants nucléaires, et qu'il aura épuisé toutes ses ressources énergétiques.

Le Soleil est en fait, à l'échelle de l'Univers, **une étoile très banale**, non seulement dans notre galaxie, mais également dans toutes les galaxies de l'Univers. En revanche, la présence de formes de vie sur une planète de notre Système solaire ou d'un autre système planétaire semble être moins banale, car elle nécessite des conditions particulièrement idéales : distance idéale entre la planète et son étoile permettant la présence d'eau liquide à sa surface, présence d'une atmosphère capable de filtrer les rayonnements dangereux de l'étoile, etc. Des conditions que seule la Terre réunit dans le Système solaire.

### **Les températures des couches internes du Soleil**

Le Soleil est constitué d'un noyau, d'une zone de radiation et d'une zone de convection. La température du noyau est de l'ordre de 16 millions de degrés ; c'est dans le noyau que se produisent les réactions de fusion thermonucléaire qui transforment les noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium en dégageant une quantité phénoménale d'énergie. Le noyau est entouré d'une zone de radiation, où la température moyenne s'élève à 5 millions de degrés. La zone de convection est plus froide, avec 2 millions de degrés. Enfin, à la surface du Soleil (appelée photosphère), la température n'est plus que de 6 000 °C. © Microsoft Corporation.

### **La couronne solaire**

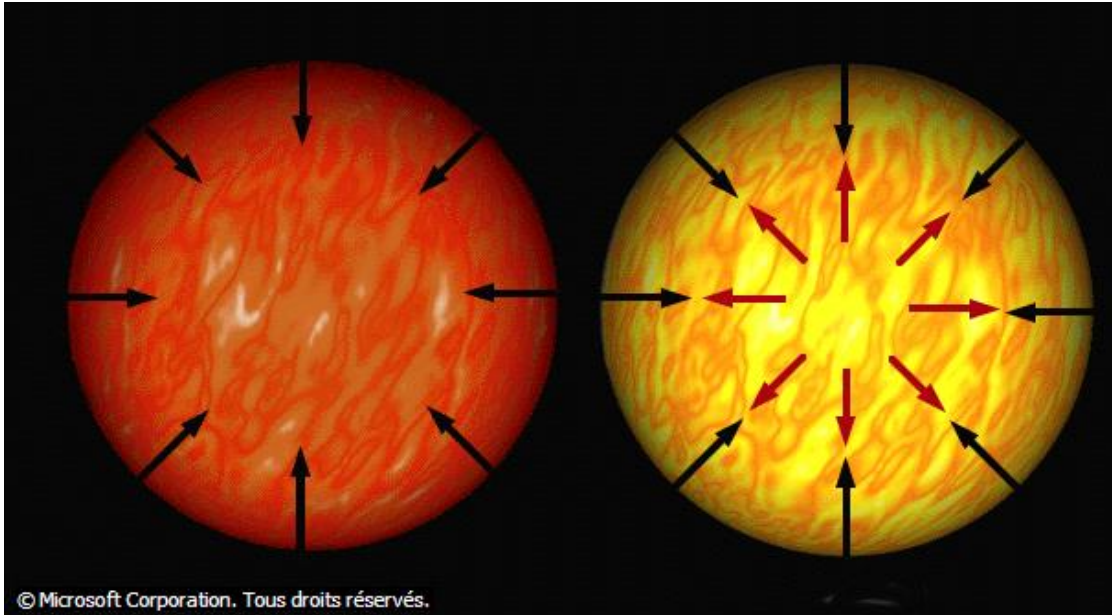


**La couronne solaire** (ou halo solaire), qui entoure le Soleil, forme l'atmosphère solaire. Elle est constituée de gaz dont la température dépasse un million de degrés. Toutefois, sa densité est de plus en plus faible à mesure qu'on s'éloigne de la surface : la couleur bleue indique les régions de densité élevée, la couleur jaune, les régions de faible densité. La couronne, invisible en temps normal, peut être observée lors des éclipses totales de Soleil.



### **Les protubérances solaires**

Sont des poches de gaz dense et froid qui se forment depuis la chromosphère (couche basse et mince de l'atmosphère solaire) et s'étendent dans la couronne chaude et diluée. Les protubérances peuvent atteindre des altitudes de 400 000 km, soit environ la distance Terre-Lune. Elles ont été observées lors des éclipses totales de Soleil.



### L'évolution du Soleil

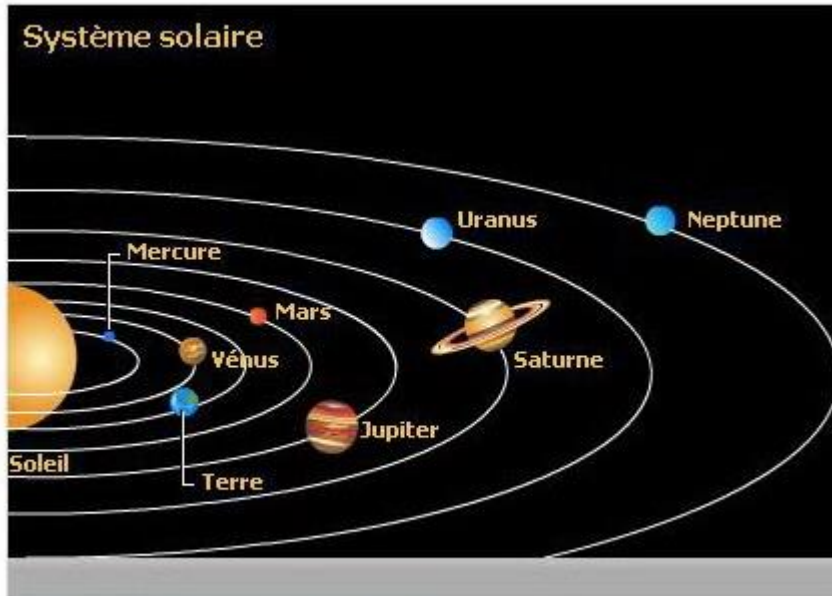
Le schéma de gauche représente la première étape de la formation du Soleil, lors de sa contraction jusqu'à sa taille actuelle. Le schéma de droite correspond à l'évolution du Soleil de nos jours : la contraction de l'étoile est contrebalancée par les forces de pression créées par les réactions de fusion thermonucléaire d'hydrogène en hélium au cœur du Soleil. En l'absence d'énergie produite en son centre, le Soleil s'effondrerait sous l'effet de son propre poids. Né il y a environ 4,6 milliards d'années, le Soleil est actuellement quasiment à mi-vie ; il s'éteindra vraisemblablement dans 5 milliards d'années pour finir en naine blanche, une fois que le cœur du Soleil aura brûlé tous ses carburants nucléaires.



### Une éclipse totale de Soleil

Une éclipse de Soleil se produit lorsque la Lune passe entre la Terre et le Soleil. On dit qu'elle est totale lorsque le disque du Soleil est entièrement recouvert par le disque de la Lune. Lors d'une telle éclipse, une auréole de couleur blanche diffuse apparaît autour du disque noir de la Lune : c'est la couronne solaire. Cette photo du Soleil a été prise au Mexique pendant l'éclipse du 11 juillet 1991.

## LE SYSTEME SOLAIRE

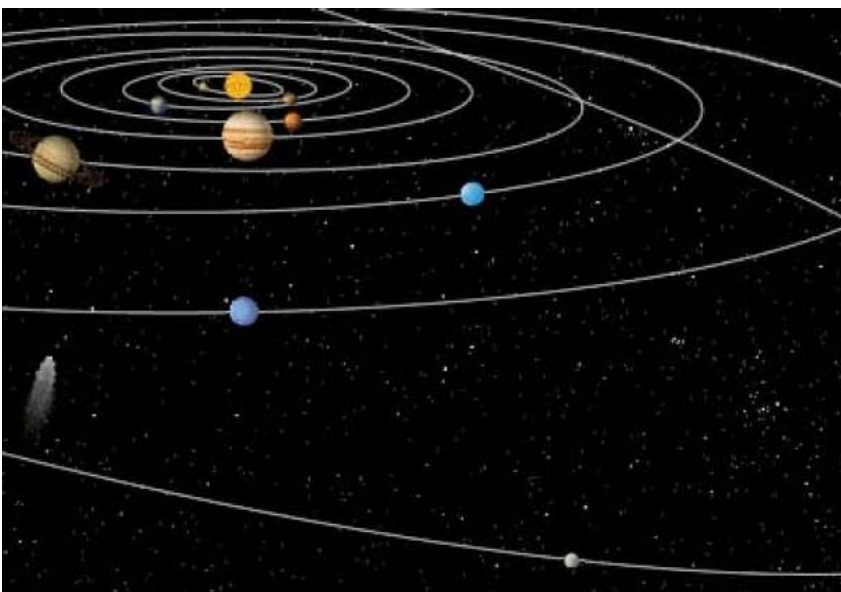


Les planètes du Système solaire

Le Système solaire est situé à la **périphérie de notre galaxie** (la **Voie lactée**), dans un **bras spiral**, et à quelque 26 000 années-lumière du centre de notre galaxie (qui a pour diamètre 100 000 années-lumière). La Voie lactée tourne sur elle-même ; le Système solaire a une vitesse de 270 km/s et effectue un tour complet en 200 millions d'années.

## LES COMPOSANTS DU SYSTÈME SOLAIRE

Le Système solaire est composé du **Soleil** autour duquel gravitent **8 planètes**, dont la Terre, et un ensemble de petits corps tels que les **comètes** et les **astéroïdes**. C'est le système astronomique dans lequel nous vivons.



Outre le **Soleil** situé au centre, le Système solaire est composé de **4 planètes rocheuses**, dites **telluriques** (semblables à la Terre) — Mercure, Vénus, la Terre et Mars (de la plus proche du Soleil à la plus lointaine) —, de **4 planètes gazeuses géantes**, dites **joviennes** (semblables à Jupiter) — Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune —, et enfin de **Pluton**, un petit corps glacé de la taille de la Lune.



Les dimensions du Système solaire sont généralement exprimées au moyen d'un étalon de distance : l'unité astronomique (UA), qui correspond à la distance moyenne de la Terre au Soleil, soit environ 150 millions de km.

Toutefois, au-delà de l'orbite de Pluton (jusqu'à 50 UA) gravitent encore plusieurs dizaines de milliers d'objets qui forment la ceinture de Kuiper, réservoir de comètes à courte période de révolution (inférieure à 200 ans). L'ensemble de ces petits corps forme la **ceinture de Kuiper**, située entre 30 et 100 UA (unités astronomiques ; une unité astronomique équivaut à la distance Soleil Terre). La ceinture de Kuiper constituerait le réservoir des **comètes** à courtes périodes du Système solaire (ce sont des comètes qui tournent autour du Soleil en moins de 200 ans), alors que le **nuage d'Oort** (du nom de l'astronome néerlandais Jan Oort qui en a supposé l'existence en 1950), jusqu'à ce jour non observé, offrirait aux confins du Système solaire (de 20 000 à plus de 150 000 UA) un réservoir de comètes à longues périodes de révolution, qui ont des orbites fortement excentriques (elles tournent autour du Soleil en plus de 200 ans limite de l'attraction gravitationnelle du Soleil).

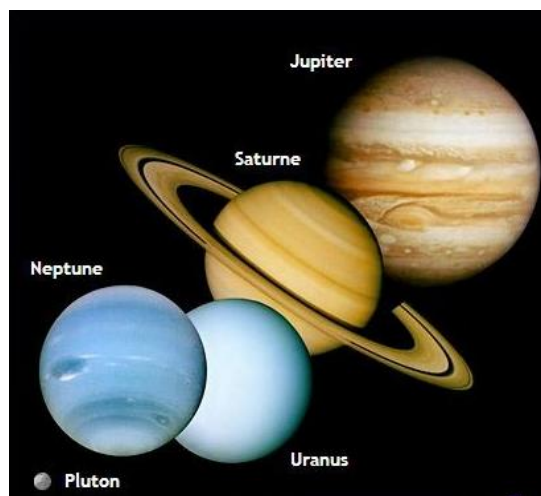
À l'exception des deux premières planètes rocheuses, Mercure et Vénus, toutes les autres planètes possèdent des **satellites naturels**, également appelés **lunes**.

La **Terre** est l'**unique planète du Système solaire** à disposer actuellement à sa surface d'**eau** dans les **trois états physiques** : **liquide** (océans, rivières, etc.), **solide** (glace, neige) et **gazeux** (vapeur d'eau des nuages). Cela est dû à la position unique de la Terre par rapport au Soleil : en deçà de cette distance, la Terre aurait été une fournaise ; au-delà de cette distance, la Terre aurait été un désert glacé. Dans les deux cas, l'émergence de la vie telle que nous la connaissons sur Terre aurait été impossible.

### Les planètes rocheuses



### Les planètes gazeuses



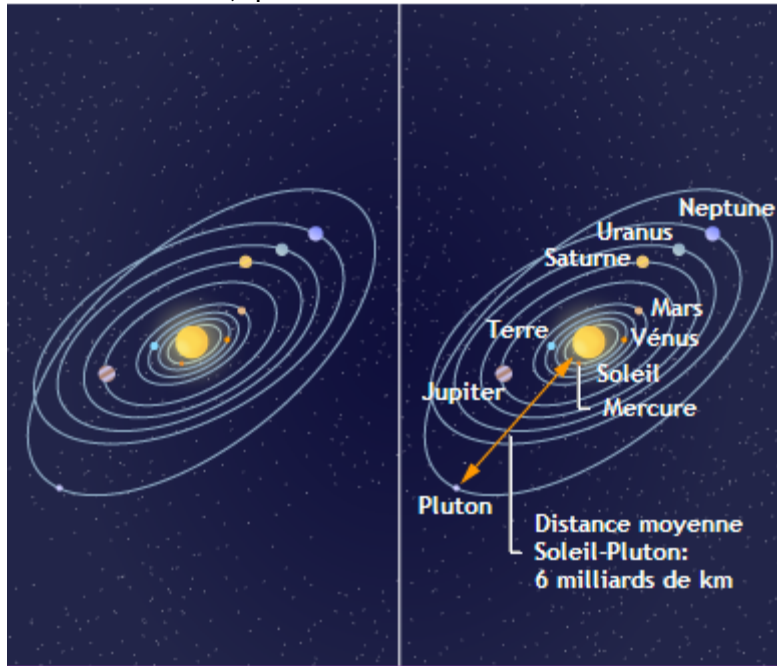
## La ceinture de Kuiper



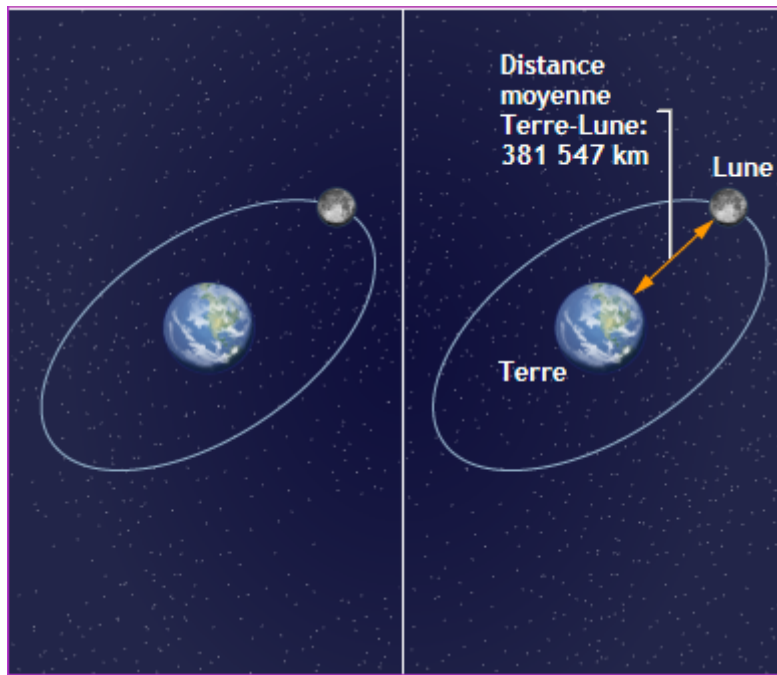
**Une comète**  
**Comète Hale-Bopp**  
Hale-Bopp, la plus brillante comète visible de la Terre depuis vingt ans, a atteint le 22 mars 1997 son point le plus proche de la Terre. On observe ici la coma, le nuage de glace et de poussière entourant le noyau de la comète.

## LA TERRE

Dans le Système solaire, la Terre occupe la troisième position en partant du Soleil. À la dernière place se trouve Pluton, qui se situe à environ 6 milliards de km du Soleil.



La Terre est une planète du Système solaire. Elle possède un seul satellite naturel : la Lune, en orbite autour de la Terre à la distance moyenne de 381 547 km. La Terre et la Lune tournent autour du Soleil en 365 jours, à la distance moyenne de 149,6 millions de km.



La Terre est la troisième planète la plus proche du Soleil parmi les neuf planètes que compte le Système solaire. C'est la seule planète où l'eau se trouve sous ses trois états : solide (glace), liquide (eau) et gaz (vapeur d'eau).



Cette photo, prise par le vaisseau Apollo 17 en 1972, montre l'Arabie, le continent africain et l'Antarctique (la zone blanche sur l'extrémité inférieure).  
Photo Researchers, Inc./NASA/Science Source.

#### La terre dans le système solaire



La Terre tourne autour du Soleil à une vitesse proche de 108 000 km/h et à une distance moyenne de 149,6 millions de km. Elle effectue un tour complet quasi-circulaire autour du Soleil (**révolution**) en une année, soit environ 365 jours. Elle tourne aussi sur elle-même (**rotation**) en 23 h 56 min, soit environ un jour. La Terre possède un seul satellite naturel : **la Lune**. Ce satellite tourne autour de la Terre en un peu plus de 27 jours, à environ 384 000 km d'altitude.



## La formation et l'évolution de la terre

La Terre est âgée de 4,6 milliards d'années. Elle s'est formée par l'agglomération (**accrétion**) des « restes » de **poussières** et de **gaz** qui n'ont pas servi à la formation du Soleil. Ces grains de matière tourbillonnants autour du Soleil ont aussi servi à former les autres planètes du Système solaire.

Après sa condensation originelle à partir des poussières et des gaz cosmiques et par attraction gravitationnelle, la Terre devait être homogène et relativement froide. Cependant, la contraction continue de ces poussières et de ces gaz, ainsi que les rayonnements radioactifs émis par certains éléments lourds, ont provoqué le réchauffement de la planète. La Terre est ensuite entrée en fusion sous l'effet de la gravité. Il y a eu ainsi formation de la croûte, du manteau et du noyau, les silicates plus légers remontant pour former le manteau et la croûte, et les éléments plus lourds, principalement le fer et le nickel, atteignant le centre de la Terre pour constituer le noyau.

### Les mouvements de la terre

La distance moyenne de la Terre au Soleil est d'environ 149,6 millions de km. La Terre et son satellite naturel, la Lune, se déplacent sur une orbite elliptique autour du Soleil. L'excentricité de cette orbite étant faible, la trajectoire est pratiquement circulaire. Une année correspond au temps mis par la Terre pour effectuer un tour complet autour du Soleil, soit environ 365 jours. La Terre tourne autour de son axe de rotation en un jour, soit 23 h 56 min 4,1 s. Un point de l'équateur tourne à une vitesse légèrement supérieure à 1 600 km/h et un point situé à 45° de latitude nord tourne à environ 1 073 km/h.

### Les mouvements à la surface de la terre

La Terre est composée de douze plaques qui recouvrent toute sa surface : ce sont les **plaques tectoniques**. La majorité des volcans se forment exactement à l'endroit où ces plaques se touchent. Les plaques bougent, se rencontrent et s'affrontent : c'est ce que l'on appelle la **dérive des continents**. Ces mouvements sont extrêmement lents : les plaques se déplacent de seulement **quelques centimètres par an**.

Les collisions entre les plaques créent le **relief** de la Terre, mais aussi les **tremblements de terre** (ou **séismes**). Le relief sur les continents (les montagnes) dépasse 8 000 m d'altitude au-dessus du niveau de la mer. La montagne la plus élevée est l'**Everest** (8 850 m d'altitude), au Népal. La profondeur moyenne des océans est de 3 800 m. La plus grande profondeur sous les mers a été relevée à la **fosse des Mariannes** (11 033 m de profondeur), dans le Pacifique Nord. Cependant, le relief de la Terre est constamment remodelé par l'**érosion** (action de l'eau, du vent et du gel) et par les activités des hommes (extension des villes, création de voies de communication, etc.).

### L'alternance jour nuit et les saisons

La vie sur la Terre se déroule selon deux échelles de temps différentes : la journée et l'année. Sur une journée alternent le jour et la nuit, sur un an, les saisons. La nuit et le jour n'ont pas une durée égale l'été et l'hiver. Les pays proches de l'équateur n'ont ni

hiver ni été, alors que les pays proches des pôles ont des hivers et des étés très longs. À quoi sont dues ces différences ?

*Réponse* : ces différences existent parce que la Terre tourne autour du Soleil tout en tournant sur elle-même et qu'elle est inclinée sur son axe de rotation.

### La Terre tourne sur elle-même

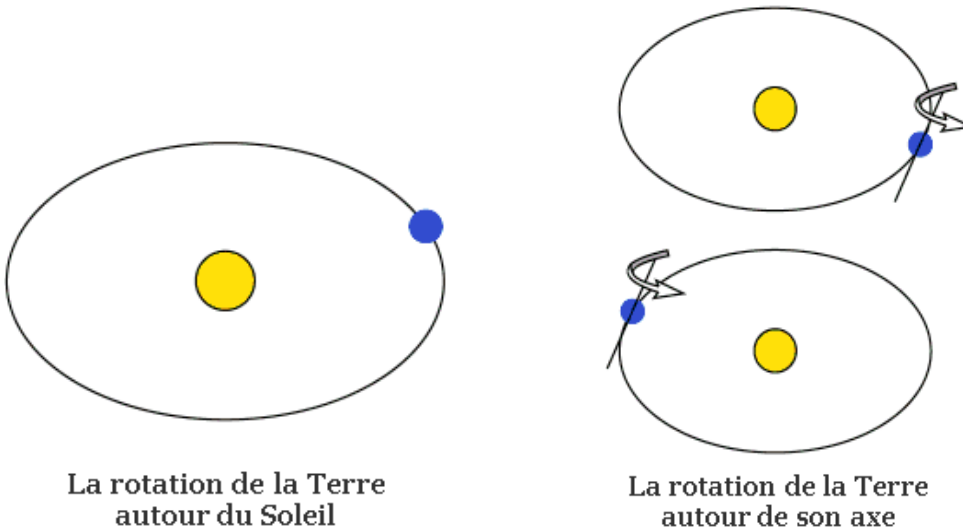
Nous ne le sentons pas mais la Terre tourne sur elle-même, autour d'un axe passant par ses pôles. Un cycle constitué d'un jour et d'une nuit dure 24 heures, le temps que met la Terre pour faire un tour complet. À tout moment, seule la moitié de la Terre faisant face au Soleil est éclairée (c'est la partie où il fait jour).

Le mouvement du Soleil dans le ciel est appelé mouvement apparent, car c'est le mouvement qu'a le Soleil si l'on considère la Terre comme immobile. Si on prend un point fixe sur la Terre (Paris, par exemple), le moment où le Soleil est au plus haut dans le ciel correspond au moment où Paris est le plus en face du Soleil ; il est alors midi au Soleil. Deux heures plus tard, la Terre a tourné ; le Soleil s'est déplacé vers l'ouest ; il est donc plus bas sur l'horizon. Enfin, au crépuscule, Paris se retrouve dans l'ombre de la Terre, c'est la nuit.

### Les rayons solaires sont plus ou moins inclinés

Dans une journée, la température varie : il fait plus chaud au milieu de la journée que le soir ou le matin. C'est vers midi (heure solaire) qu'il fait le plus chaud. Les rayons solaires arrivent alors presque **perpendiculairement** (en été) à la surface de la Terre, ils chauffent ainsi efficacement le sol. Le soir ou le matin, ils sont presque **tangents** à la surface de la Terre. L'énergie qu'ils transportent est donc répartie sur une surface plus grande. La chaleur produite par les rayons solaires arrivant sur le sol est donc moins grande. De plus, même en s'exposant face au Soleil, on attrape des coups de soleil à midi plutôt que le matin ou le soir. L'atmosphère filtre une partie des rayonnements solaires. Plus les rayons solaires arrivent tangents à la surface de la Terre, plus la couche de l'atmosphère qu'ils traversent est grande et moins ils sont énergétiques.

### La Terre tourne autour du Soleil



La rotation de la Terre  
autour du Soleil

La rotation de la Terre  
autour de son axe

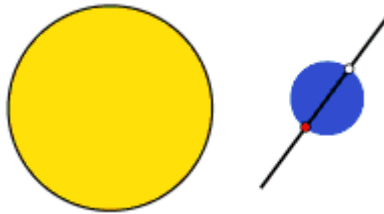
La Terre tourne autour du Soleil en **365,25 jours**. Elle parcourt une **ellipse** en restant dans un plan appelé plan écliptique. Une ellipse ressemble à un cercle aplati ; celle décrite par la Terre correspond à un cercle ayant un rayon moyen de 150 millions de

kilomètres. La Terre n'est donc pas toute l'année à la même distance du Soleil. Sur le schéma suivant, les échelles ne sont pas respectées. L'axe autour duquel tourne la Terre à une direction constante. Il est incliné par rapport au plan écliptique de  $23^{\circ}30'$ .

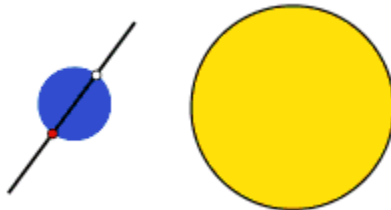
### L'alternance des saisons

Les saisons sont définies **en fonction de la durée du jour**. L'hiver est la saison où le jour dure le moins longtemps. Les quatre saisons que nous connaissons n'existent pas dans les pays proches de l'équateur. La durée du jour y varie peu pendant l'année. Par contre, au niveau du cercle polaire, l'hiver est très long (six mois) et pendant environ trois mois, la nuit dure 24 heures.

**Aux pôles** : étudions l'éclairement du pôle Nord (point blanc sur les schémas qui suivent) pendant l'hiver. Comme l'axe de la Terre est incliné, le pôle Nord reste à l'ombre en permanence. Au pôle Sud (point rouge) au contraire, il fait jour tout le temps. Sur les deux schémas suivants, l'inclinaison de l'axe de la Terre est exagérée.



Six mois plus tard, la Terre est de l'autre côté du Soleil et c'est l'été dans l'hémisphère nord : la durée des jours et des nuits entre les pôles Nord et Sud est alors inversée.



**Dans l'hémisphère nord** : on découpe l'année en **quatre saisons**. L'équinoxe de printemps, premier jour du printemps, correspond à l'égalité du jour et de la nuit. Voici un résumé du déroulement de saisons :

- Le printemps : début à l'équinoxe de printemps (le 20 mars) où le jour est égal à la nuit. Puis, les jours augmentent et les nuits diminuent.
- L'été : début au solstice d'été (le 21 juin), le jour le plus long de l'année (environ 16 heures). Ensuite, les jours diminuent alors que les nuits augmentent.
- L'automne : début à l'équinoxe d'automne (le 22 septembre) ; le jour y est égal à la nuit. Les jours diminuent ; les nuits augmentent.
- L'hiver : début au solstice d'hiver (le 21 décembre), le jour le plus court de l'année, environ 8 heures. Les jours augmentent ; les nuits diminuent.

**Dans l'hémisphère sud**, le rythme des saisons est inversé par rapport à celui de l'hémisphère nord. Au printemps de l'hémisphère nord correspond l'automne de l'hémisphère sud, à l'été correspond l'hiver, etc.

# Notre Lune



## la Lune

La Lune est le seul satellite naturel de la Terre. Elle est criblée d'impacts de météorites qui atteignent toute sa surface puisqu'elle est dépourvue d'atmosphère. Observée à l'œil nu, la surface de la Lune présente de grandes taches sombres, appelées abusivement « mers lunaires », qui sont en fait de vastes plaines.

Encyclopédie Encarta  
John Sanford/Science Source/Photo Researchers, Inc.



la formation de la Lune



la formation de la Lune

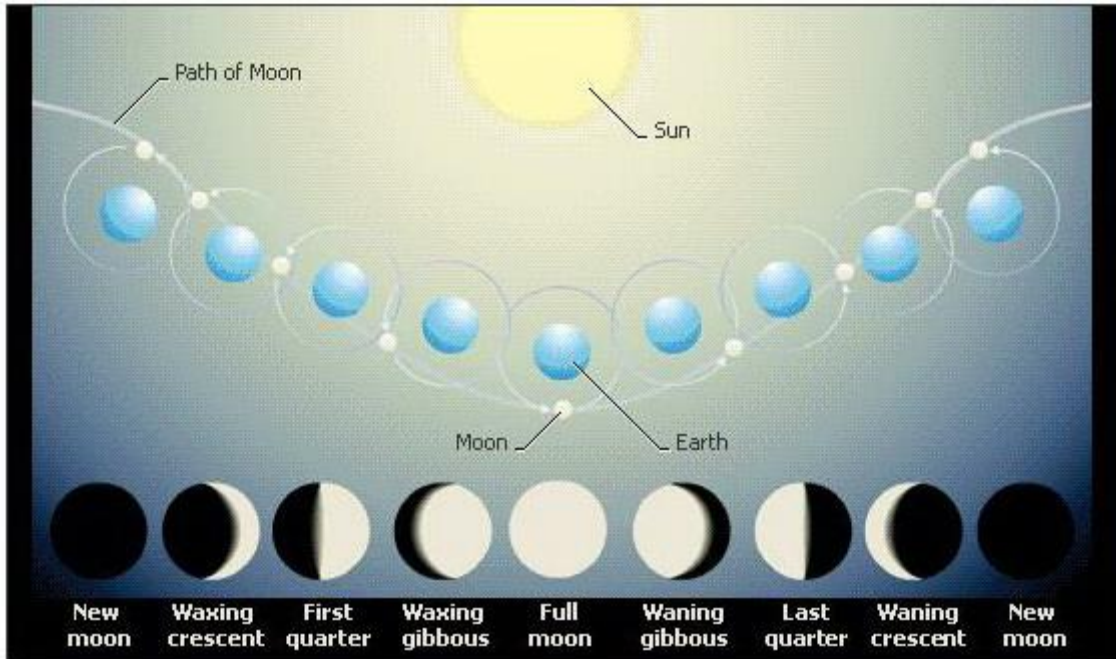


la formation de la Lune



la formation de la Lune





### Phases of the Moon

The appearance of the Moon from Earth depends on the relative positions of the Earth, Moon, and Sun. This illustration shows what the Moon looks like from Earth at different stages of the Moon's orbit.

Encarta Encyclopedia

© Microsoft Corporation. All Rights Reserved.

## Cartes géographiques et topographiques

**La géodésie**, étude de la forme de la Terre, de ses dimensions, et de son champ de gravitation. Bien que la Terre ne possède pas une surface lisse, il est nécessaire pour l'établissement des cartes de la considérer comme telle. Le choix évident pour une telle « surface de référence » est le niveau de la mer moyen, mais celui-ci n'étant pas identique partout, on utilise une surface idéalisée appelée géoïde.

**La carte** est une image **réduite**, **plane** et **symbolique** (= **conventionnelle**) utilisée pour représenter des données de caractères divers, réparties dans l'espace. La carte géographique couvre une vaste surface. Seuls les grands traits y sont représentés. La carte topographique, à l'inverse, couvre une portion assez faible de la surface terrestre et reproduit le plus grand nombre possible de détails de terrain.

### **Image réduite**

Une carte est un " modèle réduit " de la surface terrestre. Le rapport de réduction est l'**échelle** de la carte que l'on exprime sous forme d'une fraction simple : 1/25 000, 1/50 000, 1/250 000... Par exemple, sur une carte au 1/100 000ème, 1 cm sur la carte correspond à 100 000 cm soit 1 km sur le terrain.

Le choix de l'échelle est guidé par le type d'utilisation désirée. Un randonneur pédestre utilisera une carte au 1/25 000ème alors que l'automobiliste préférera une carte au 1/100 000ème voir 1/250 000ème.

### **Image plane et géométriquement exacte**

La carte est un document plan qui représente, de façon géométriquement exacte, une portion d'un objet globalement sphérique : la Terre. La Terre a en réalité la forme d'un ellipsoïde aplati aux pôles (rayon équatorial : 6378 km, rayon polaire : 6367 km).

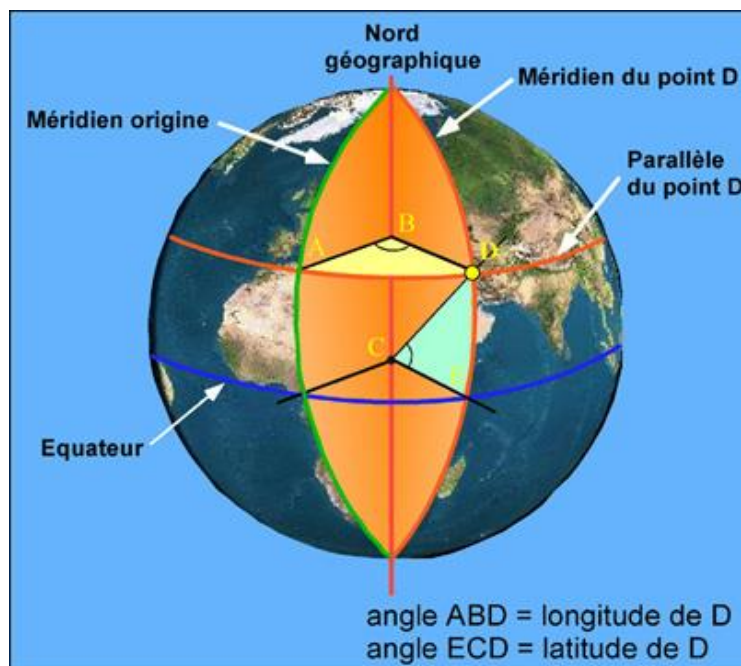


Figure 1 : Coordonnées géographiques (latitude et longitude) d'un point.

Au plan de la carte correspond donc une calotte sphérique ou plus exactement une portion d'une surface ellipsoïdale. Il est nécessaire d'opérer une transformation telle qu'à chaque point de la surface de l'ellipsoïde corresponde un point du plan. Cette opération mathématique établissant une correspondance entre des coordonnées géographiques sphériques (Fig.1) et des coordonnées cartésiennes est une **projection**. Elle s'accompagne inévitablement de déformations : altérations des mesures angulaires, ou des longueurs, ou des surfaces.

En France, le système utilisé par l'I.G.N. ([Institut Géographique National](#)) est la **projection conique conforme de Lambert**. On peut l'assimiler à une projection géométrique d'une portion de la Terre sur un cône dont le sommet est situé sur l'axe des pôles et qui est tangent à l'ellipsoïde le long d'un parallèle dit parallèle moyen de contact (Fig.2). Pour que l'altération des longueurs reste négligeable, la France est divisée en 4 zones qui ont chacune leur système de projection, donc leur parallèle moyen. Dans le système de projection de Lambert, les méridiens sont représentés par des droites concourantes.

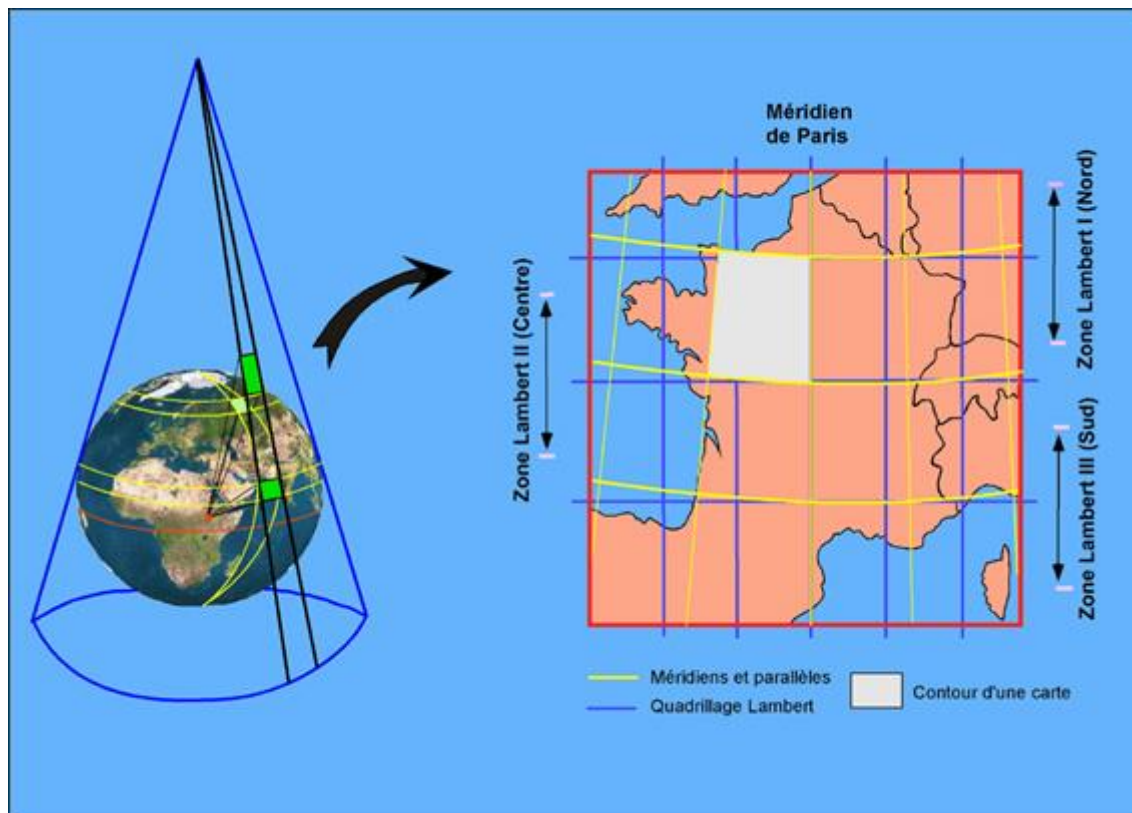


Figure 2: Principes de la projection conique de Lambert et Zones Lambert en France Métropolitaine

## Longitudes et latitudes sur Google Earth

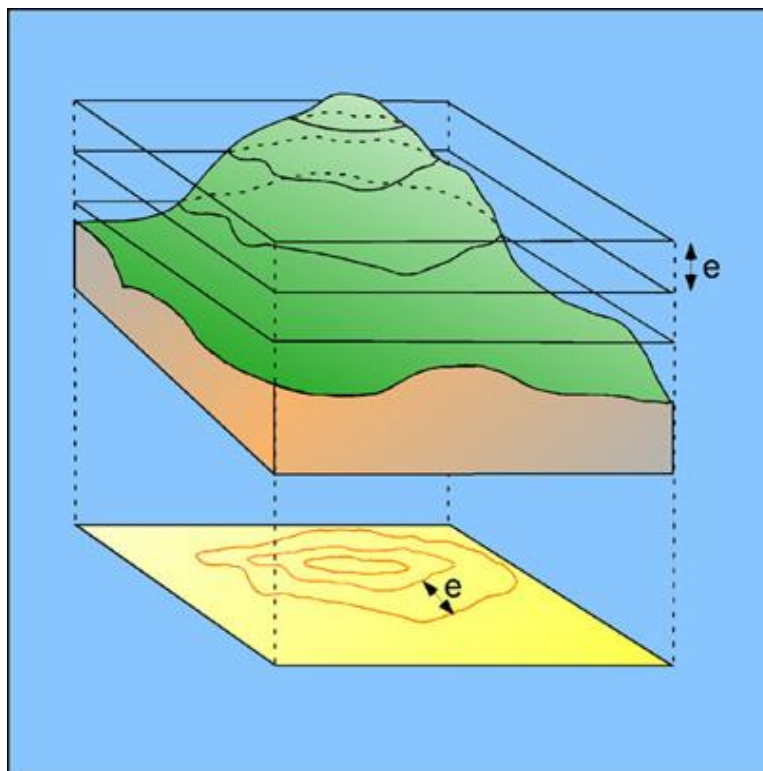
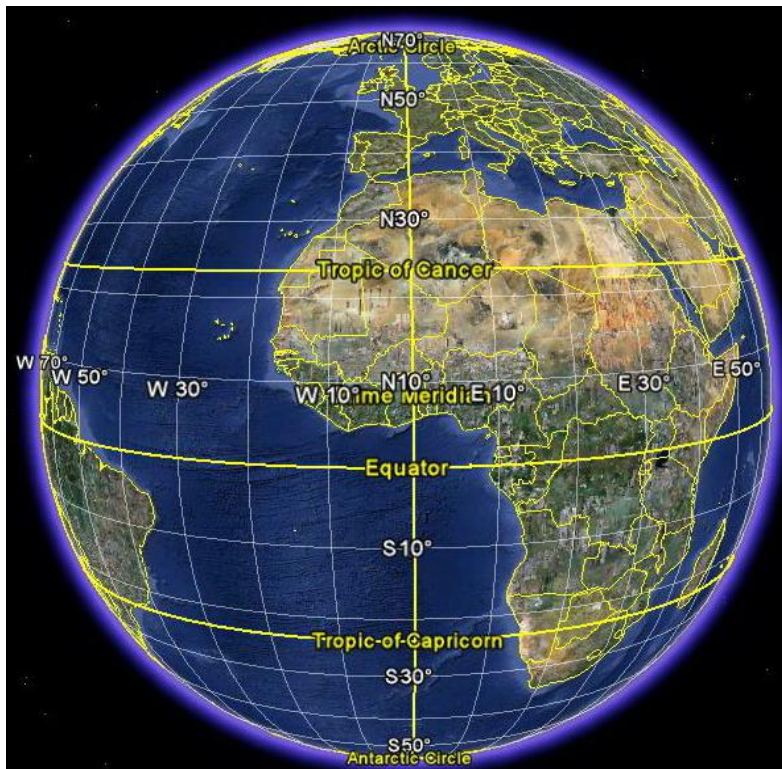


Figure 3 : Principe d'établissement des courbes de niveau.



La **topographie** et la **cartographie** donnent des représentations graphiques du relief terrestre sur des cartes et des plans géographiques.

La topographie de la surface terrestre est restituée par l'intermédiaire de **courbes de niveau**. Une courbe de niveau correspond à l'intersection de la surface topographique avec un plan horizontal d'altitude donné. Elle joint donc un ensemble de points de même altitude. La différence d'altitude entre les plans horizontaux est appelée **équidistance** des courbes de niveau (Fig.3).

## L'ATMOSPÈRE TERRESTRE

L'atmosphère est une **immense couche de gaz et de poussières** qui enveloppe le globe terrestre.

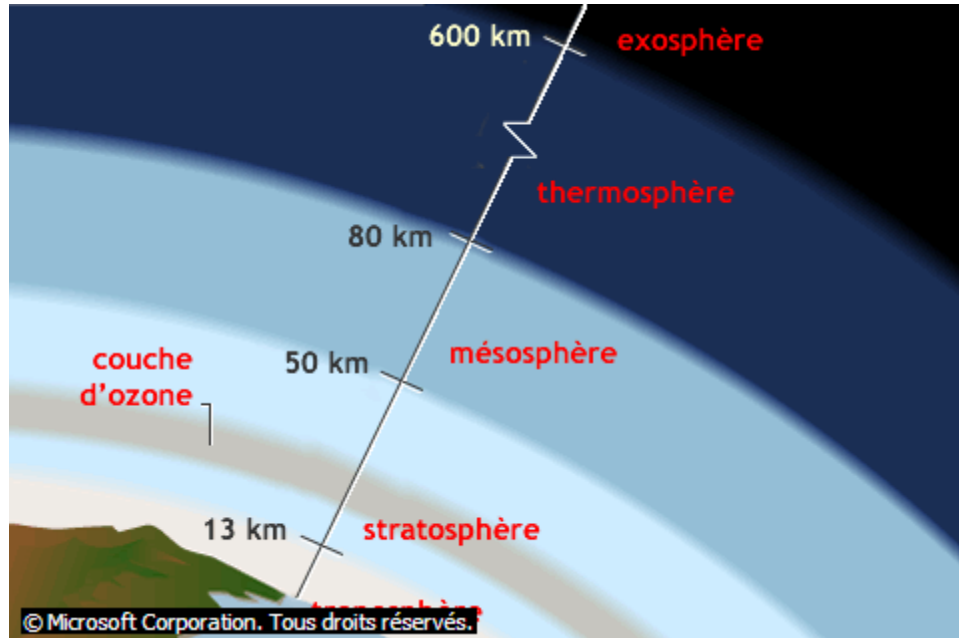
### La composition de l'atmosphère terrestre

Les trois principaux gaz de l'atmosphère (sans tenir compte de la vapeur d'eau) sont l'**azote (78,1 %)**, l'**oxygène (20,9 %)** et l'**argon (0,9 %)**. Beaucoup d'autres gaz sont présents dans l'atmosphère, mais en quantités extrêmement faibles : le dioxyde de carbone, le néon, l'hélium, le krypton, l'hydrogène, le xénon et l'ozone. Il y a aussi de la **vapeur d'eau** dans l'atmosphère : entre 1 % (vers les pôles) et 4 % (vers l'équateur).

Par ailleurs, différents types de fines particules (appelées **aérosols**) sont aussi en suspension dans l'air : poussières provenant de volcans, grains de sable et de sel, pollens, gaz polluants rejetés par les industries, etc. Ces aérosols circulent dans les basses couches de l'atmosphère.

### Les différentes couches de l'atmosphère terrestre

L'atmosphère est épaisse d'environ 10 000 km. Mais 99 % de sa masse se trouve dans les 30 premiers kilomètres. L'atmosphère est divisée en 5 couches superposées. Chacune de ces couches a des propriétés différentes (épaisseur, température, pression).



Depuis la surface de la Terre, ces couches sont :

**La troposphère** est la couche la plus proche de la surface de la Terre. Sa température diminue de 6,5 °C par km d'altitude. Son épaisseur moyenne est de 13 km. Sa limite supérieure s'appelle la **tropopause** (température d'environ - 60 °C).

La masse de la troposphère représente 80 % de la masse totale de l'atmosphère, alors que son volume ne représente que 1,5 % du volume total. C'est dans la troposphère que les **phénomènes météorologiques** (précipitations, tornades, éclairs, etc.) se déroulent. C'est également là que s'accumulent les gaz polluants issus des activités humaines (industries, transports). Lorsqu'on parle de **pollution atmosphérique**, il s'agit donc principalement de la pollution de l'air de la troposphère.

**La stratosphère** est une couche qui monte jusqu'à une altitude de 50 km (appelée **stratopause**), où la température est proche de celle de la surface terrestre. La température augmente progressivement dans la stratosphère car la **couche d'ozone** absorbe le rayonnement solaire (entre 20 et 30 km d'altitude). Le célèbre **trou de la couche d'ozone** se situe également dans cette couche.

**La mésosphère** se situe entre 50 et 80 km d'altitude. La température diminue jusqu'à -140 °C au niveau de la cime de la mésosphère (appelée **mésopause**). C'est dans cette couche que les **météores** brûlent et forment les étoiles filantes.

**La thermosphère** s'étend entre 80 et 600 km d'altitude. Les molécules d'air deviennent très rares. Les températures sont très élevées (jusqu'à 1 200 °C). C'est dans la thermosphère que se produisent les **aurores polaires** (les aurores **boréales** dans l'hémisphère Nord et les aurores **australes** dans l'hémisphère).

**L'exosphère** s'étend jusqu'à 10 000 km d'altitude, là où s'arrête l'atmosphère et où commence l'espace. C'est dans cette zone que gravitent les **satellites artificiels**.

## L'ORIGINE ET L'ÉVOLUTION DE L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE

L'atmosphère terrestre a évolué de manière continue depuis la naissance de la Terre (il y a environ 4,6 milliards d'années). L'atmosphère était d'abord constituée d'hydrogène et d'hélium ; mais ces gaz très légers se sont rapidement échappés dans l'espace en raison de la faible gravité (force d'attraction) de la Terre.

La première véritable atmosphère (composée principalement de dioxyde de carbone, d'azote et de vapeur d'eau) s'est formée grâce aux **éruptions volcaniques**. À cette époque en effet, la Terre était recouverte de volcans très actifs, qui ont éjecté d'énormes quantités de gaz de l'intérieur de la Terre. Plus de 80 % de cette atmosphère se sont constitués durant les 150 premiers millions d'années après la formation de la Terre.

La Terre s'est ensuite refroidie et une grande partie de **la vapeur d'eau de l'atmosphère s'est condensée** (passage de l'état de gaz à l'état liquide) : des pluies diluviennes se sont alors abattues sur Terre et ont formé **les océans**.

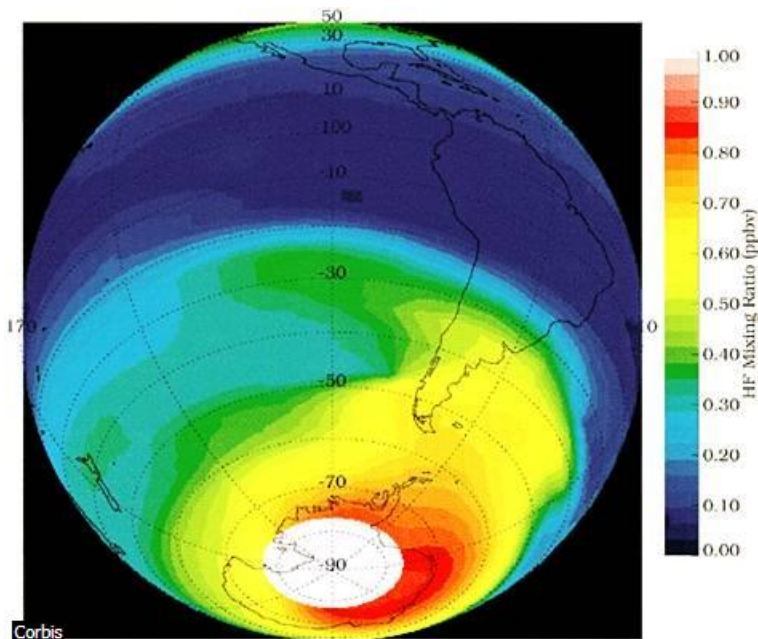
Au cours des deux milliards d'années suivants, de l'**oxygène** est apparu dans l'atmosphère grâce à l'activité d'organismes marins (bactéries et algues) pratiquant la **photosynthèse** (en effet, au cours de la photosynthèse, de l'oxygène est produit et rejeté dans le milieu). Il a encore fallu deux milliards d'années avant que l'oxygène se trouve en quantité suffisante dans l'atmosphère pour former une **couche d'ozone en mesure de protéger la Terre des rayons ultraviolets du Soleil**. Cela a permis aux êtres vivants de sortir des océans, il y a environ 440 millions d'années.

## Les aurores polaires

Les aurores polaires se forment dans la couche de la haute atmosphère appelée ionosphère (ou thermosphère), qui s'étend de 80 à 600 km d'altitude. Dans cette couche, les molécules d'air entrent en collision avec le vent solaire (flux de particules chargées provenant du Soleil), provoquant un phénomène lumineux spectaculaire. Cette aurore boréale, observée à Fairbanks en Alaska, prend la forme de vagues colorées suivant les lignes du champ magnétique terrestre.



## La répartition de l'ozone dans l'atmosphère

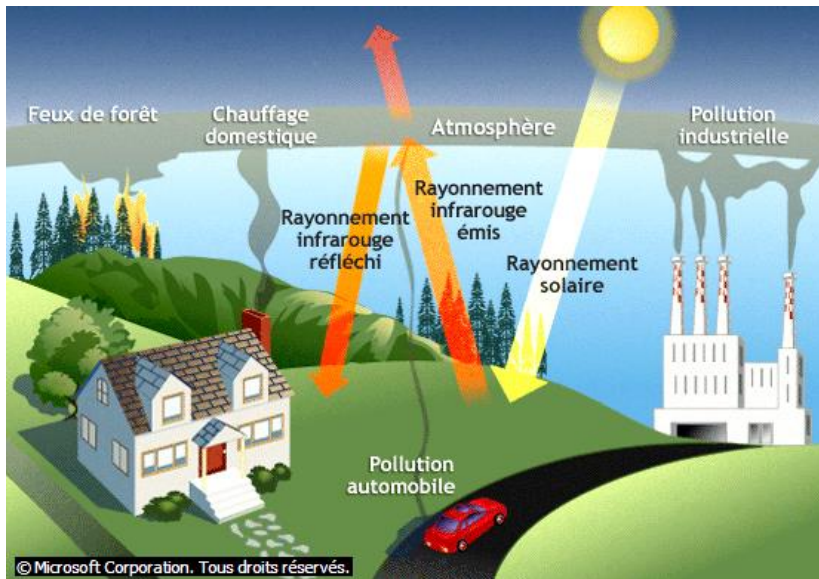




La couche d'ozone est la partie de l'atmosphère où la concentration d'ozone est O<sub>3</sub> est maximale. D'après cette image, obtenue à partir de données recueillies par les satellites de la NASA, la concentration d'ozone autour de la Terre n'est pas uniforme ; elle varie en fonction des zones géographiques. Elle est notamment plus faible au-dessus de l'Antarctique (zone matérialisée par la couleur blanche), où se forme le fameux « trou » de la couche d'ozone.

On notera que la gamme de couleurs utilisée dans cette image correspond en fait aux concentrations d'un gaz (l'acide fluorhydrique HF) qui permet de suivre l'évolution de la concentration d'ozone : plus la concentration d'acide fluorhydrique est élevée, plus la concentration d'ozone est faible. Dans la basse atmosphère se concentrent également une proportion variable de gaz polluants et de très faibles quantités d'aérosols (poussières d'origine volcanique ou industrielle, grains de sable et de sel, pollens, etc.). Les gaz polluants — monoxyde de carbone (CO), méthane (CH<sub>4</sub>), oxydes d'azote (N<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>), ammoniac (NH<sub>3</sub>), dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), chlorofluorocarbures (CFC), etc. —, majoritairement d'origine anthropique (qui résulte ou témoigne d'une ancienne action humaine), sont à l'origine de diverses dégradations environnementales, telles que les effets des pluies acides, le trou de la couche d'ozone ou l'effet de serre.

### Le principe de l'effet de serre



L'effet de serre est un phénomène naturel, mais il est aujourd'hui perturbé par les activités humaines qui rejettent de nombreux gaz dans l'atmosphère. Cette pollution atmosphérique renforce l'effet de serre et entraîne un réchauffement climatique préjudiciable à l'environnement.

### GÉODYNAMIQUE EXTERNE

Introduction : Qu'est-ce que la " géodynamique externe " ?

La géodynamique externe désigne l'ensemble des **forces** mises en jeu et les **mouvements** qui résultent de l'action de ces forces dans les **enveloppes externes**.

Ces enveloppes, dites encore " superficielles ", sont les plus légères de la Terre : il s'agit des gaz formant l'**atmosphère** et de l'eau formant l'**hydrosphère**. Composées de liquide ou de gaz, ont les propriétés d'un fluide, et présentent à ce titre une dynamique intense avec des mouvements très rapides.

## **Les circulations atmosphériques et océaniques**

### **Introduction sur les circulations : Pourquoi l'atmosphère et les océans sont-ils dynamiques ?**

Pour qu'un corps soit dynamique, il lui faut une importante source d'énergie. Par la suite, cette énergie est transformée en énergie mécanique (forces de mouvement), et enfin en énergie cinétique (mouvement propre).

Dans le cas d'une voiture par exemple, la combustion du carburant produit de l'énergie, laquelle est utilisée pour actionner des pistons et créer ainsi des forces mécaniques capables d'imprimer un mouvement à la voiture.

Dans le cas de la tectonique des plaques, c'est l'énergie emmagasinée par la Terre au cours de son accrétion et de sa condensation, qu'elle restitue par ailleurs continuellement au milieu interstellaire, qui est responsable du mouvement des plaques lithosphériques.

Contrairement à ce dernier exemple, la **source d'énergie** à l'origine de la **dynamique des enveloppes externes** est extérieure à la Terre : c'est le Soleil.

Dans sa globalité, la Terre est à l'**équilibre thermique** : le rayonnement infrarouge émis par la Terre dans l'espace est strictement compensé par l'énergie solaire qu'elle absorbe à sa surface. La température moyenne de la Terre au sommet de l'atmosphère, de 255 K, soit  $-18^{\circ}\text{C}$ , est fixée par cet équilibre. La présence d'une atmosphère constituée de " gaz à effet de serre " augmente la température moyenne de surface de la Terre (au niveau du sol et des océans) d'une trentaine de degrés par rapport à celle au sommet de l'atmosphère.

Mais localement, la température de surface varie, à cause de l'inégale répartition de l'énergie solaire. C'est cette inégalité qui est, à proprement parler, le moteur des circulations atmosphériques et océaniques : elles s'organisent en effet de façon à diminuer les écarts de température à la surface de notre planète.

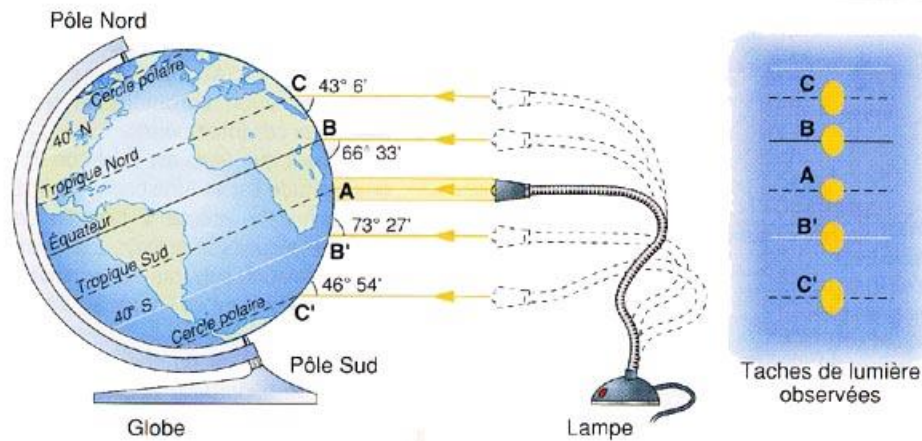
Nous allons tout d'abord étudier le **bilan énergétique** global de la Terre (ou encore son bilan " radiatif ") afin de comprendre quels sont les paramètres qui contrôlent la température moyenne à la surface de la Terre. Puis nous regarderons ce qui crée, régionalement, les **variations de température**.

### **Le bilan énergétique de la Terre.**

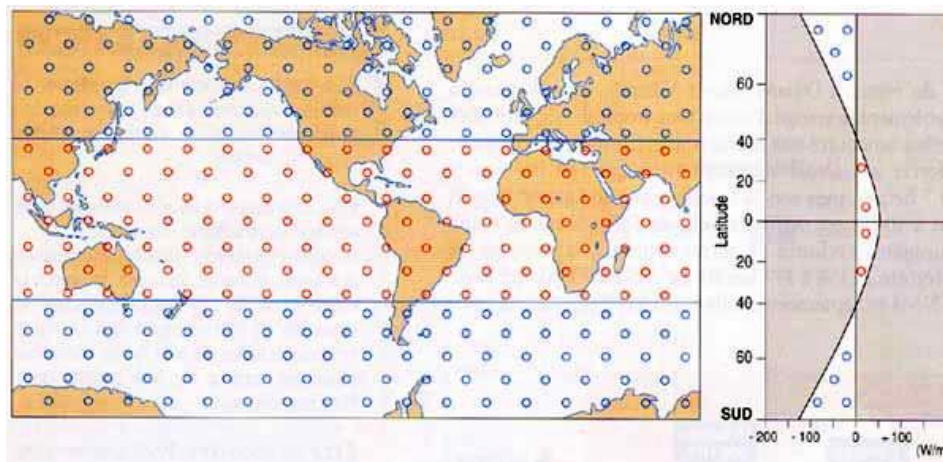
Quels sont les paramètres qui contrôlent la température moyenne à la surface de la Terre ? Comment se répartit le rayonnement solaire à la surface de la Terre ?

Si la Terre est globalement à l'équilibre thermique, l'énergie solaire est néanmoins distribuée de façon variable à sa surface. Nous verrons ci-dessous comment cette distribution inhomogène provoque la circulation des enveloppes fluides et de quelle manière l'équilibre thermique est pourtant maintenu sur l'ensemble du globe.

- Une expérience simple, illustrée dans le document 1, permet de visualiser de quelle manière le rayonnement solaire se répartit à la surface de la Terre.

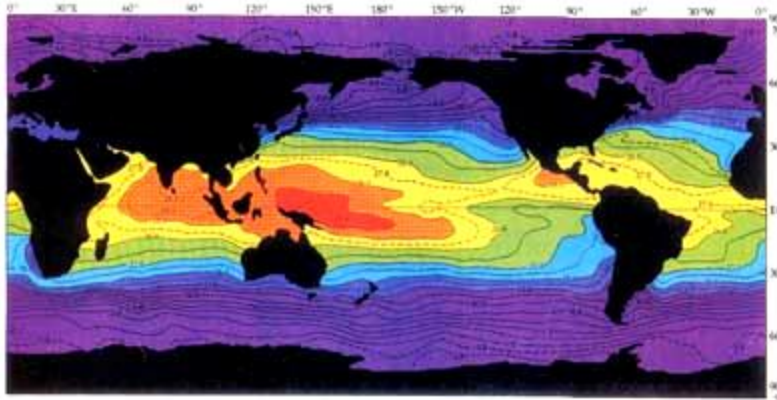


Document 1 : Approche expérimentale de la répartition de l'énergie solaire à la surface de la Terre. Un faisceau de lumière de faible section, envoyé sur la surface d'un globe, simule le rayonnement solaire. Le déplacement de ce faisceau de l'équateur vers les pôles permet de visualiser l'effet de la variation d'incidence du rayonnement avec la latitude.



L'inégalité de la répartition de l'énergie solaire engendre des variations de température en fonction de la latitude.

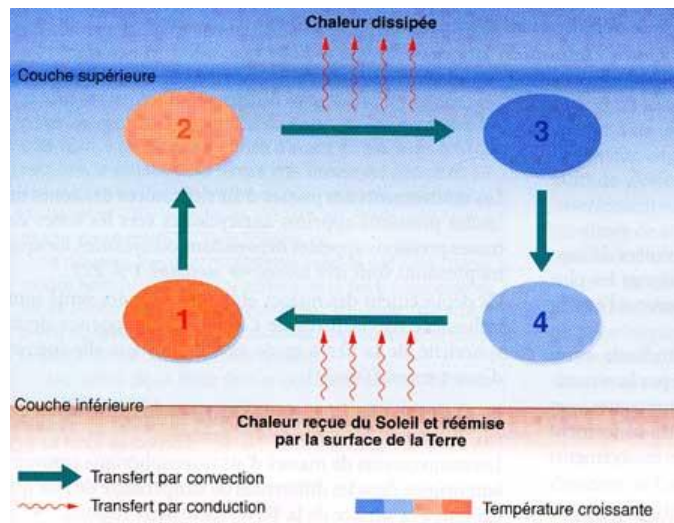
- En raison de la variation d'incidence du rayonnement solaire avec la latitude, le bilan énergétique de la Terre n'est pas équilibré en tout point du globe : la différence entre le flux solaire absorbé et le rayonnement infrarouge réémis par la Terre dans l'espace est positive ou négative – et localement nulle (document 2).



Document 3 : Répartition spatiale de la température moyenne de surface de l'océan mondial. La couleur rouge indique une température supérieure à 29°C, la couleur violette, une température inférieure à 18°C.

### Comment expliquer la dynamique des masses d'air ?

La dynamique des enveloppes externes est directement liée à la variation d'incidence du rayonnement solaire en surface de notre planète. La première couche de l'atmosphère, la **troposphère**, est chauffée à sa base par l'énergie solaire reçue et réémise par la surface de la Terre : c'est ce qui permet le mouvement des masses d'air sous forme de **cellules de convection**. La circulation troposphérique, par la suite, entraîne celle des masses d'eau superficielles et induit de cette façon une circulation océanique de surface. Nous allons étudier comment se met en place une cellule convective dans la **troposphère**.



Document 4 : Circulation d'un fluide entre deux couches limites de température différente : principe d'une cellule convective.

Dans un volume de matière compris entre deux couches limites et échauffé par sa base, une " boucle de circulation " ou " cellule convective " s'établit selon le mécanisme suivant (voir Document 4) :



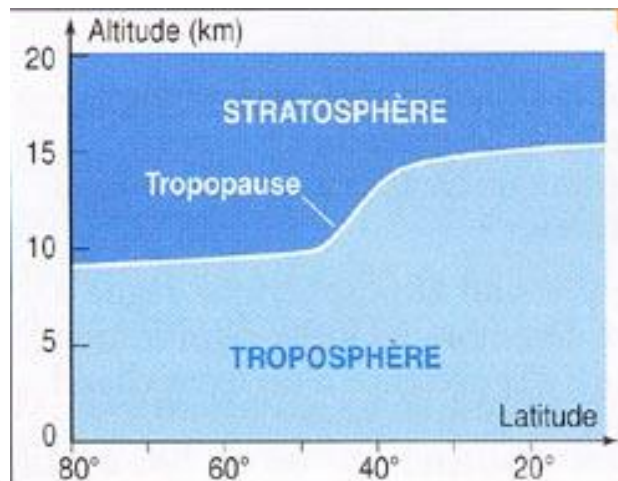
- Le volume de matière est échauffé par sa base et la masse volumique de la matière diminue (1)
- Ce volume de matière devient plus léger que celui qui le surmonte, et s'élève jusqu'à la couche supérieure (2)
- Après avoir migré horizontalement et perdu une partie de sa chaleur, ce volume de matière redevient plus lourd que son environnement et chute (3 et 4)
- Le retour à l'état initial est assuré par la couche inférieure, où il migre horizontalement en gagnant de la chaleur.

Les mouvements verticaux des masses d'air **dans la troposphère** sont donc dus à des variations de masse volumique (créées par des différences de température) tandis que les mouvements horizontaux sont dus à des différences de pression.

### La dynamique de l'atmosphère

Il est nécessaire, en premier lieu, de connaître la **composition chimique** et la **structure** de l'atmosphère avant d'étudier les mouvements qui l'animent. Nous pourrions par la suite étudier la dynamique de l'atmosphère. La circulation atmosphérique prend essentiellement place dans une couche particulière de l'atmosphère : la plus basse, la **troposphère**. Cependant, la couche sus-jacente, la **stratosphère**, est également affectée par des mouvements de matière très lents.

La troposphère est la couche d'air comprise entre la surface de la Terre et les autres couches de l'atmosphère : c'est l'air que nous respirons. Elle est caractérisée par la présence des nuages et des phénomènes climatiques (précipitations, etc.). Cette couche contient 99% de la vapeur d'eau de l'atmosphère et la température y diminue de 6,5°C par kilomètre



Document 5 : Variation d'altitude de la tropopause (limite entre la troposphère et la stratosphère) avec la latitude.

La limite supérieure de la troposphère varie en fonction des latitudes : elle se situe vers 18 km au-dessus de l'équateur où l'air est chaud et dilaté, et vers 8 km dans les hautes latitudes, près des pôles, où l'air est froid et contracté.

La stratosphère est la seconde couche principale de l'atmosphère, située au-dessus de la troposphère. La mésosphère et la thermosphère sont les couches dites "supérieures". L'augmentation de température dans la thermosphère est due à l'absorption du rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde (rayons X et UV) par le dioxygène.

L'atmosphère de la Terre est animée de mouvements permanents, notamment dans sa partie la plus basse, la troposphère. Dans cette couche de l'atmosphère, les masses d'air sont animées de courants horizontaux et verticaux, de direction latitudinale et/ou méridienne. Les vents peuvent toutefois être modifiés par la répartition des terres et des mers, la présence de montagnes ... et varient avec les saisons. Si ces mouvements concernent surtout la troposphère, il existe aussi des mouvements horizontaux dans la stratosphère.

### La circulation troposphérique

Des mouvements importants animent les masses d'air atmosphériques. Ces "circulations" atmosphériques résultent de l'inégale répartition de l'énergie solaire arrivant à la surface du globe et de la rotation de la Terre sur elle-même. C'est au niveau de la troposphère que naissent les vents de surface qui permettent d'homogénéiser la température à la surface du globe. Les mouvements dans la troposphère sont de nature convective (**cf. Document 4**) et peuvent être turbulents. La grande majorité des nuages (les *cumulo nimbus* en particulier) les mettent en évidence.



Document 6 : Dépression centrée sur l'Irlande et photographiée par un satellite. Le mouvement de rotation inverse à celui des aiguilles d'une montre, caractéristique d'une dépression dans l'hémisphère nord, est bien matérialisé par la distribution de la masse nuageuse. Les mouvements des masses d'air s'effectuent initialement des zones de haute pression (anticyclones) vers les zones de basse pression (dépressions). (Doc. 7).

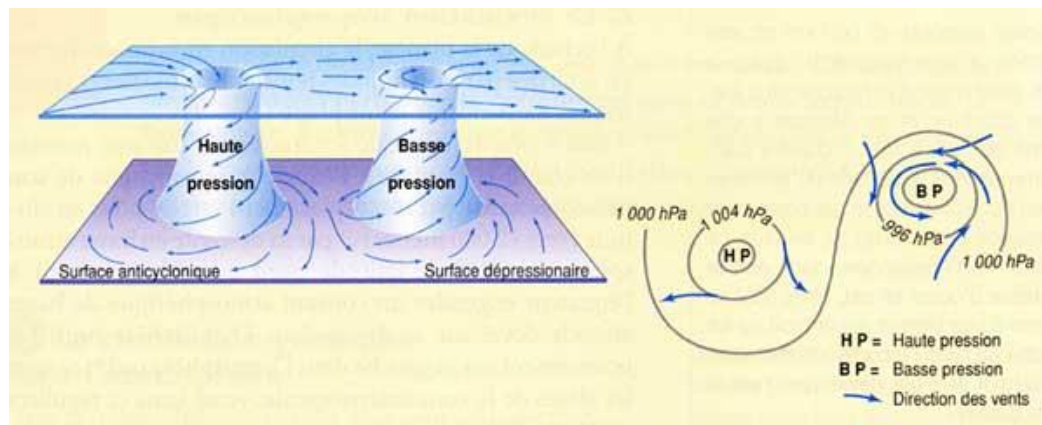
## La direction des vents de surface

L'étude des cartes météorologiques montre que les mouvements horizontaux, et donc les vents, le déplacement des nuages ... et le temps qu'il fait, peuvent être corrélés à des différences de pression atmosphérique entre deux régions. Les mouvements des masses d'air s'effectuent des zones de hautes pressions, appelées anticyclones, vers les zones de basses pressions, appelées dépressions ou cyclones lorsque les pressions sont très basses. Ce déplacement des nuages et la direction des vents sont influencés par la force de Coriolis, conséquence de la sphéricité de la Terre et de sa rotation sur elle-même, d'ouest en est (voir document 7).

A l'échelle globale, les zones d'ascendance d'air (équateur et 60° de latitude) sont des zones de basse pression. A l'inverse, la descente d'air froid est génératrice de hautes pressions (tropiques et pôles). Ainsi les alizés sont dirigés des tropiques vers l'équateur, soufflant d'est en ouest en raison de la force de Coriolis. De la même manière, le domaine tempéré est affecté de vents soufflant des hautes pressions tropicales vers les basses pressions situées vers 60° de latitude, mais déviés vers l'est par la force de Coriolis (document 8).

## Compléments sur la circulation troposphérique

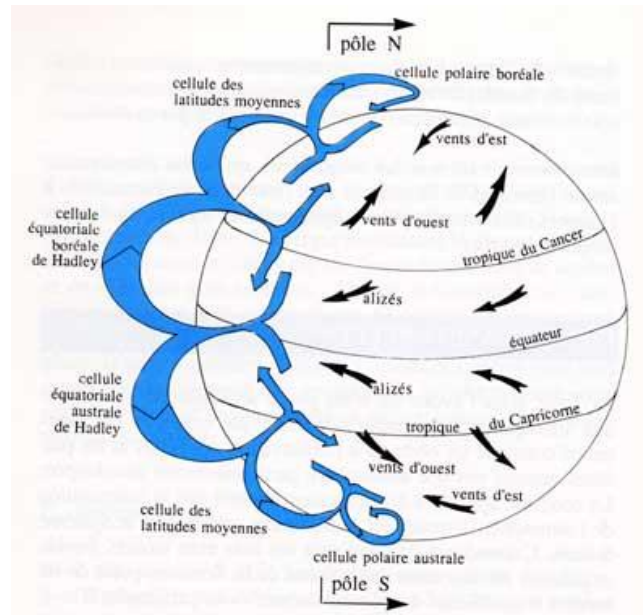
Les mouvements des masses d'air s'effectuent initialement des zones de haute pression (anticyclones) vers les zones de basse pression (dépressions) (Document 7). La **force de Coriolis** dévie ensuite les masses d'air vers la droite (par rapport au sens du mouvement) dans l'hémisphère Nord, et vers la gauche dans l'hémisphère Sud.



Document 7 : Trajectoire de l'air à la surface de la Terre dans l'hémisphère Nord. Dans l'hémisphère nord, l'air s'éloigne des zones anticycloniques en effectuant une spirale descendante tournant dans le sens des aiguilles d'une montre et se rapproche des dépressions où il s'enroule en une spirale ascendante tournant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

Dans les zones anticycloniques de l'hémisphère nord, l'air décrit une spirale descendante tournant dans le sens des aiguilles d'une montre pour s'éloigner et rejoindre une zone dépressionnaire dans laquelle il monte en une spirale tournant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (document 7). Ces mouvements

d'enroulement en sens inverse pour un même hémisphère s'expliquent par la combinaison de la force de Coriolis, des forces d'expulsion anticycloniques et des forces d'aspiration dépressionnaires. A l'échelle de la planète, la circulation troposphérique est caractérisée par trois grandes boucles hélicoïdales et symétriques dans chaque hémisphère.



Document 9 : Les circulations troposphériques s'organisent en trois boucles symétriques dans chaque hémisphère. En raison de la force de Coriolis (voir document 14), les vents de surface sont déviés dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud ; aussi les boucles thermiques forment-elles une spirale continue dans chaque bande de latitude.

- Une boucle "**tropicale**", caractérisée par une montée d'air chaud et humide à l'équateur accompagnée de son refroidissement, par son déplacement vers les pôles en altitude (vers 12 000 mètres) et par sa descente en basse atmosphères vers 30° de latitude nord ou sud. Le retour à l'équateur engendre un courant atmosphérique de basse altitude dévié sur sa droite dans l'hémisphère nord (et inversement sur sa gauche dans l'hémisphère sud) : ce sont les alizés de la zone intertropicale, vents lents et réguliers soufflant d'est en ouest,
- Une boucle "**tempérée**" avec ascendance d'un air tiède et tempéré vers 60° de latitude et descente en zone tropicale (30° de latitude nord ou sud). Le retour de la masse d'air, à basse altitude, vers la latitude de 60° est associé aux vents d'ouest caractéristiques des zones tempérées,
- Une boucle "**polaire**" associée à cette même montée d'air tiède et tempéré à 60° nord ou sud, mais avec une descente d'air froid aux pôles. Dans ces hautes latitudes s'établissent des vents d'est, froids et secs.





Document 8 : Les vents à la surface du globe. La longueur des pointes de flèche indique schématiquement la vitesse du vent.

## L'hydrosphère

L'**hydrosphère** est la partie de la planète occupée par l'eau liquide (océans, mers, lacs, fleuves, nappes phréatiques) , solide (calottes polaires, glaciers, banquise) et gazeuse (nuages , vapeur d'eau). Cette sphère s'étend depuis environ 8 km d'altitude (la cime des montagnes les plus élevées) jusqu'à près de 11 km de profondeur (fosses océaniques).

L'eau de l'hydrosphère est en perpétuel mouvement : courants, ondes et marées agitent les mers, les lacs et les fleuves, les glaciers glissent sur les continents, les icebergs voguent à la dérive, poussés par les vents et les courants, et mille ruisselets s'infiltrent dans la roche, creusant des grottes et se chargeant en sel tandis qu'ils courent vers la mer.

L'hydrosphère modèle la lithosphère en l'érodant mais aussi en transportant les débris et en les accumulant au point de former de nouvelles structures géologiques.

L'eau ayant une chaleur spécifique élevée, l'hydrosphère constitue un énorme réservoir de chaleur et influence de façon déterminante les climats et les vents des terres émergées.

L'hydrosphère est constituée d'eau et d'ions, dont deux sont responsables de sa salinité (la grande majorité de l'eau liquide sur terre est salée) : ce sont les ions sodium (Na<sup>+</sup>) et chlorure (Cl<sup>-</sup>).

## Mers et océans

Les mers sont de grandes masses d'eau salée déterminées par des archipels, de grandes îles ou péninsules ou par des terres relativement proches les unes des autres. Les océans, bien plus grands, séparent les continents et atteignent une profondeur bien supérieure. Les continents se prolongent sous l'eau par une plate-forme continentale d'environ 200 m de profondeur ; celle-ci s'achève par un dénivelé abrupt, le talus continental, qui rejoint les grands fonds vers 3 000 m de profondeur.

Bien que les océans et les mers communiquent les uns avec les autres, leur salinité, leur densité et leur température sont différentes. Ainsi les eaux tropicales sont-elles plus salées que les eaux où se jettent les grands fleuves et que les mers froides, du fait de la plus forte évaporation ou parce que les sels se dissolvent mieux dans une eau chaude. La plus forte salinité se rencontre dans la mer Rouge (44 g/l en moyenne et jusqu'à 300 g/l localement), la plus faible, dans la mer Baltique (2 g/l), la salinité moyenne étant de 35 g/l.

### *Mers intérieures et lacs*

Les mers intérieures et les lacs sont d'importants réservoirs d'eau plus ou moins douce. Selon leur origine on distingue les lacs **volcaniques** (circulaires), **glaciaires** (de forme allongée et irrégulière) résultant de la fonte d'anciens glaciers, **tectoniques** (irréguliers) formés par les mouvements de la croûte terrestre (ex. la **mer Morte**), **côtiers** (formés d'eau saumâtre), **karstiques** (occupant des dépressions argileuses), **résiduels** (restes d'anciennes mers ou golfes, ex. la **mer Caspienne**), **alluvionnaires**, et enfin **de barrage** (artificiels ou naturels).

### *Fleuves*

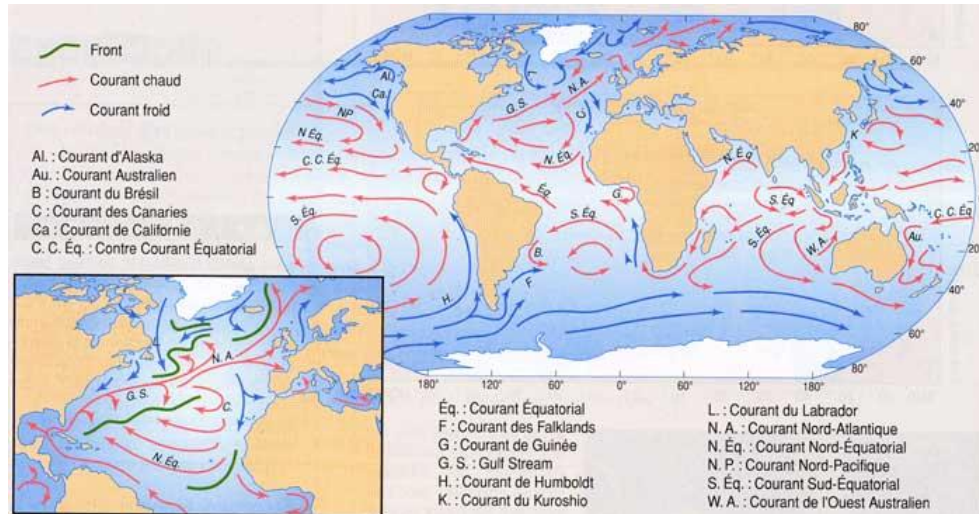
Ils sont alimentés par les précipitations atmosphériques (via les torrents) ou la fonte des glaciers et sont caractérisés par un flux d'eau permanent. La quantité d'eau qui traverse à chaque seconde une section d'un cours d'eau est appelée son **débit**, mesuré en m<sup>3</sup>/sec; le débit est maximal durant la crue et minimale durant l'étiage. La région recouvrant l'ensemble des affluents d'un fleuve constitue son **bassin hydrographique**.

## La dynamique des océans

Les océans représentent 70 % de la surface de la Terre et 97 % du volume des eaux de l'hydrosphère. Les eaux océaniques sont affectées par deux types de circulation. A leur surface, elles obéissent à une circulation guidée par les vents, tandis qu'en profondeur, une circulation dépendant de leur température et de leur salinité les anime.

### **Comment s'organisent la circulation des eaux de surface et celle des eaux profondes ? 1. La circulation superficielle**

Les courants de surface sont le résultat d'une interaction entre l'océan et l'atmosphère. L'atmosphère exerce, par l'intermédiaire des vents, une force d'entraînement mécanique (force de frottement) sur les eaux de surface. Celles-ci sont donc poussées par les vents, mais selon une trajectoire déviée sur sa droite dans l'hémisphère Nord (ou sur sa gauche dans l'hémisphère Sud), en raison de la force de Coriolis.



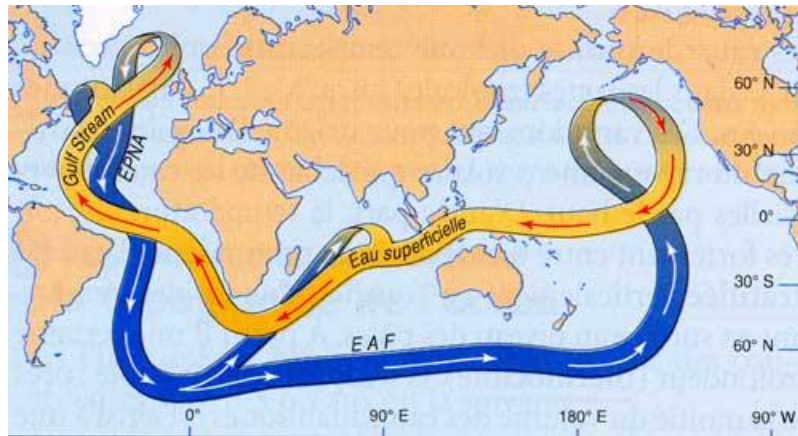
Document 2: Carte des principaux courants de surface des océans mondiaux.

La vitesse des courants de surface varie de quelques centimètres par seconde à plus de 2 m par seconde pour le Gulf Stream le long des côtes de la Floride.

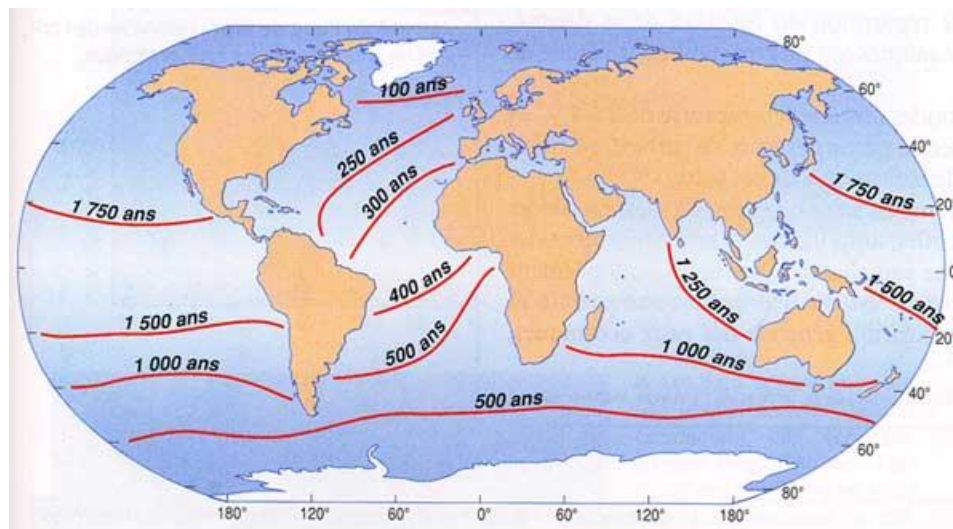
## 2. Température et salinité gouvernent la distribution des eaux océaniques

Les eaux de surface ont une température qui décroît de 30°C dans les zones tropicales jusqu'à - 2°C aux latitudes élevées. Ces variations ont pour origine l'inégale répartition du rayonnement solaire qui chauffe les eaux superficielles par le haut. D'autre part, la température décroît très fortement entre 0 et 1000 m de profondeur : l'eau est **stratifiée** verticalement en couches plus froides, remontant en surface au niveau des pôles. La salinité des eaux océaniques, en moyenne voisine de 34,71 grammes de sels dissous par litre d'eau (= 34,71 pour mille), détermine également une distribution latitudinale et verticale de l'eau.

La circulation océanique profonde est gouvernée actuellement par le plongement d'eaux froides et sur salées aux hautes latitudes. Aux hautes latitudes, la congélation de l'eau douce en surface de l'océan, ou encore la formation de la banquise, provoque une augmentation de la salinité de l'eau de mer sous-jacente. A ce phénomène, qui prend place dans les régions polaires, s'associe des températures très basses de l'eau. Les eaux de surface deviennent denses et tendent à plonger, à 3000 m de profondeur environ. Ces mouvements sont à l'origine d'une circulation océanique globale, ou **circulation thermo haline**. L'eau superficielle chaude et de faible salinité qui remonte dans l'Atlantique nord, s'évapore, se refroidit, gèle partiellement, se sur sale, plonge et alimente la masse d'Eau Profonde Nord Atlantique (EPNA). La vitesse moyenne des circulations profondes, déterminées à l'aide des éléments radioactifs solubles (isotope 14 du carbone) n'excèdent pas quelques millimètres par seconde.



Document 3 : La circulation thermo haline globale est gouvernée par les modifications de température et de salinité des eaux océaniques.



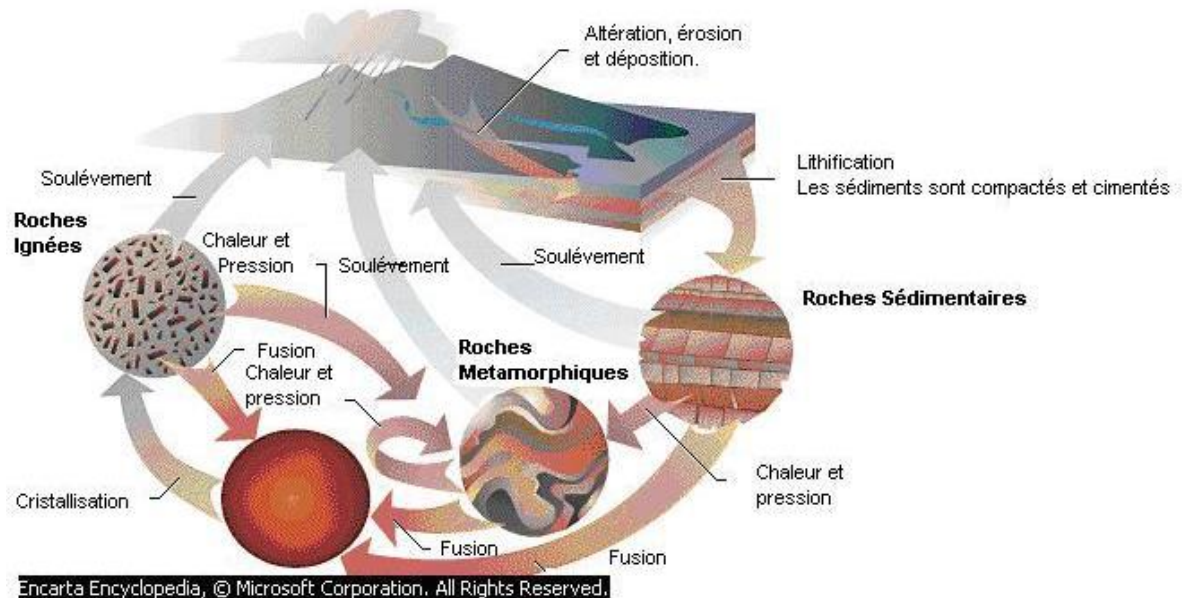
Document 4: Age des eaux profondes (3000 m de profondeur) exprimé en années et déterminé à l'aide du carbone 14.

## LA GÉOLOGIE

Géologie, science traitant de l'origine de la Terre, de son histoire, de sa forme, des matériaux qui la composent et des processus qui influent ou qui ont influé sur elle.

La géologie s'intéresse aux roches et aux matériaux dérivés qui composent les couches externes du globe terrestre. Afin de comprendre la genèse de ces matériaux, la géologie recourt aux connaissances d'autres domaines scientifiques, comme la physique, la chimie et la biologie. Ainsi, des secteurs aujourd'hui très importants de la géologie, comme la géochimie, la géophysique, la géochronologie (emploi des méthodes de datation) ou encore la paléontologie, peuvent-ils maintenant être considérés comme des disciplines à part entière, qui donnent aux géologues la possibilité de mieux appréhender le fonctionnement de la planète Terre à travers le temps.





### Cycle de la roche

Le cycle de la roche représente l'interaction des processus internes (endogènes) et externes (exogènes) de la Terre. Il décrit notamment les processus de transformation de chacun des trois principaux types de roches (roches sédimentaires, métamorphiques et magmatiques) en roches de l'un ou l'autre des deux autres types, voire en roches d'un type spécifique différent. Les sédiments compactés, cimentés et parfois recristallisés forment des roches sédimentaires ; les roches soumises à de fortes chaleurs et pressions forment des roches métamorphiques ; les roches issues du refroidissement puis de la solidification de magma forment des roches magmatiques (ou ignées).

### Chronologie relative : Principes élémentaires

Pour raconter l'histoire de la Terre et des planètes, il faut disposer de repères temporels ou, au moins, situer dans le temps, les uns par rapport aux autres, les objets ou les événements géologiques. Il est facile d'observer, au bord d'une route ou dans une carrière, des successions de roches de diverses natures éventuellement déformées ou cassées : telle roche est au-dessus de telle autre, une faille recoupe tel ensemble de formations. Un des problèmes fondamentaux de la géologie est d'établir, à partir des relations géométriques observées entre ces roches, des relations temporelles, c'est à dire de construire une chronologie : cette roche s'est déposée après cette autre, la faille est postérieure aux formations recoupées...

Une deuxième question concerne la comparaison de deux ou plusieurs chronologies édifiées en des endroits différents : comment établir des corrélations entre elles ?

### Chronologie relative

Le passage d'une succession géométrique à une succession temporelle repose sur quelques principes élémentaires, appelés "**principes de chronologie**" (ou "principes de stratigraphie" car énoncés à partir de l'étude des roches sédimentaires).

**Principe de superposition** : Quand plusieurs couches sont superposées, la couche inférieure est la plus ancienne, la couche supérieure la plus récente (Fig.1).

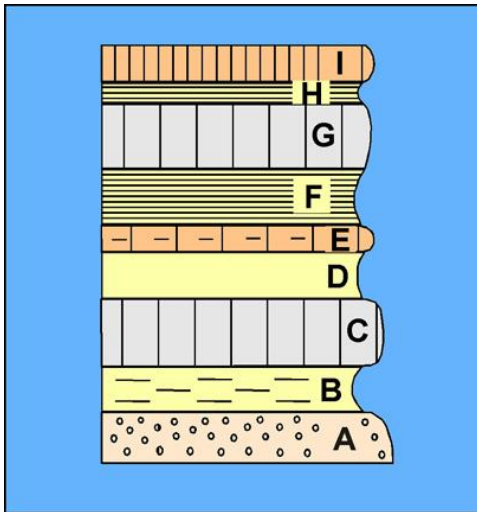


Figure 1

Principe de superposition.

La couche B s'est déposée après la couche A.

La couche I est la dernière déposée.

Ce principe semble évident, mais il n'est valable qu'à deux conditions :

- les couches se sont disposées horizontalement,
- les couches n'ont pas été retournées par des événements tectoniques ultérieurs.

**Principe de recoupement** : Un événement ou un objet qui affecte un autre événement ou un autre objet est postérieur à ce dernier.

Ex : une faille est postérieure à la plus jeune des formations qu'elle recoupe (Fig.2).

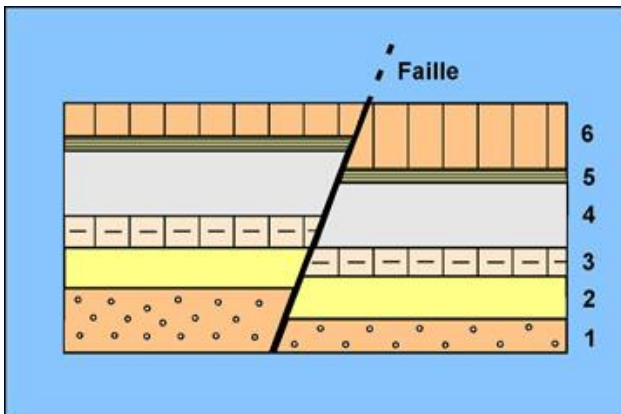


Figure 2 : Principe de recoupement. La faille est plus récente que la couche 6 qu'elle recoupe.

### Corrélations

Le principe fondamental utilisé pour comparer des successions lithologiques observées en différentes régions est appelé " **Principe de continuité** " : Sur toute son étendue, un même banc a partout le même âge, c'est à dire qu'il s'est déposé ou formé dans le même laps de temps.

Age (Ma)	ERE	Système
	QUATERNAIRE	
2	CENOZOIQUE ou TERTIAIRE	Néogène
25		Paléogène
65	MESOZOIQUE ou SECONDAIRE	Crétacé
144		Jurassique
205		Trias
245	PALEOZOIQUE ou PRIMAIRE	Permien
290		Carbonifère
360		Dévonien
400		Silurien
425		Ordovicien
495		Cambrien
530	PRECAMBRIEN	Protérozoïque
2500		Archéen
3800		

Figure 3 : Divisions stratigraphiques des temps géologiques.

Les comparaisons sont basées sur la nature lithologique ou sur les assemblages fossiles. Grâce à différents groupes : foraminifères, ammonites, pollens..., on a pu établir des échelles bio stratigraphiques (successions de fossiles ou de groupes fossiles que l'on rencontre toujours dans le même ordre) et découper les temps géologiques en périodes de durée variable : ères, systèmes, étages, zones (Fig.3).

### La structure interne de la Terre : Les séismes

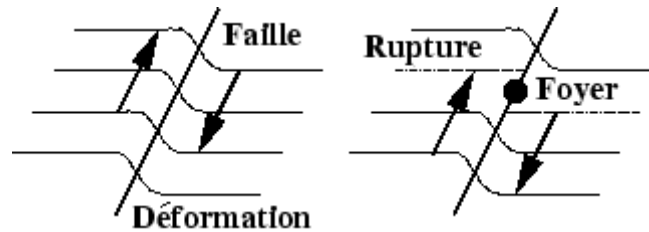
Les séismes ou tremblements de terre constituent un phénomène géologique qui de tout temps a terrorisé les populations qui vivent dans certaines zones du globe.

#### Origine des tremblements de terre ?

Lorsqu'un matériau rigide est soumis à des contraintes de cisaillement, il va d'abord se déformer de manière élastique, puis, lorsqu'il aura atteint sa limite d'élasticité, il va se

rupturer, en dégageant de façon instantanée toute l'énergie qu'il a accumulé durant la déformation élastique.

C'est ce qui se passe lorsque la lithosphère est soumise à des contraintes. Sous l'effet des contraintes causées le plus souvent par le mouvement des plaques tectoniques, la lithosphère accumule l'énergie. Lorsqu'en certains endroits, la limite d'élasticité est atteinte, il se produit une ou des ruptures qui se traduisent par des failles. L'énergie brusquement dégagee le long de ces failles cause des séismes (tremblements de terre).



Si les contraintes se poursuivent dans cette même région, l'énergie va à nouveau s'accumuler et la rupture consécutive se fera dans les plans de faille déjà existants. A cause des forces de friction entre les deux parois d'une faille, les déplacements le long de cette faille ne se font pas de manière continue et uniforme, mais par coups successifs, dégageant à chaque fois un séisme. Dans une région donnée, des séismes se produiront à plusieurs reprises le long d'une même faille, puisque cette dernière constitue un plan de faiblesse dans la lithosphère.

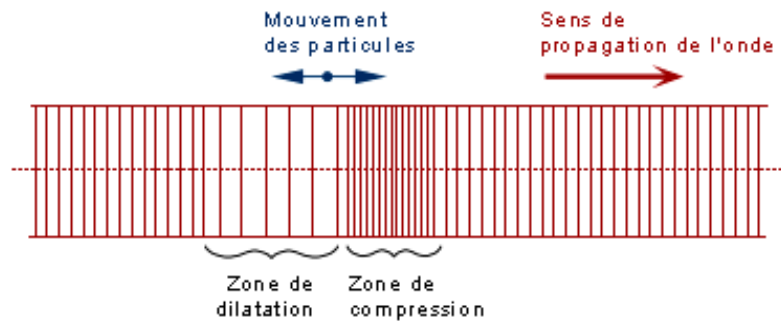
A noter que les séismes ne se produisent que dans du matériel rigide. Par conséquent, les séismes se produiront toujours dans la lithosphère, jamais dans l'asthénosphère qui est plastique. Lorsqu'un séisme est déclenché, un front d'ondes sismiques se propage dans la croûte terrestre.

On nomme foyer le lieu dans le plan de faille où se produit réellement le séisme, alors que l'épicentre désigne le point à la surface terrestre à la verticale du foyer. On distingue deux grands types d'ondes émises par un séisme : les ondes de fond, celles qui se propagent à l'intérieur de la terre et qui comprennent les ondes S et les ondes P, et les ondes de surface, celles qui ne se propagent qu'en surface et qui comprennent les ondes de Love et de Rayleigh.

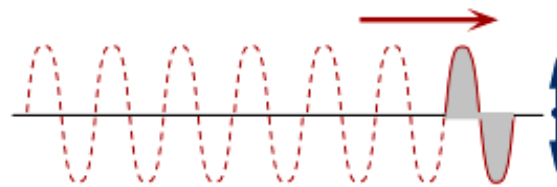
Les ondes P sont des ondes de compression assimilables aux ondes sonores et qui se propagent dans tous les états de la matière. Les particules se déplacent selon un mouvement avant arrière dans la direction de la propagation de l'onde. Les ondes S sont des ondes de cisaillement qui ne se propagent que dans les solides. Les particules oscillent dans un plan vertical, à angle droit par rapport à la direction de propagation de l'onde. Les ondes de Love ou ondes L sont des ondes de cisaillement, comme les ondes S, mais qui oscillent dans un plan horizontal. Elles impriment au sol un mouvement de vibration latéral. Les ondes de Rayleigh sont assimilables à une vague; les particules du sol se déplacent selon une ellipse, créant une véritable vague qui affecte le sol lors des grands tremblements de terre.



**Onde P** (compression)



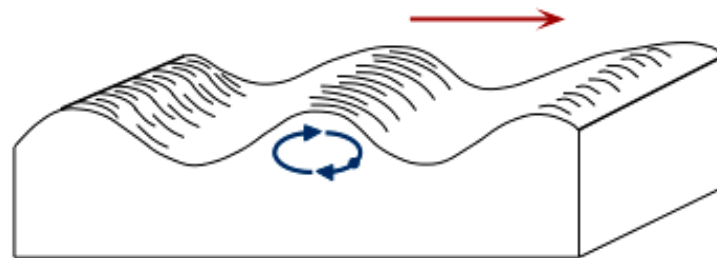
**Onde S** (cisaillement)

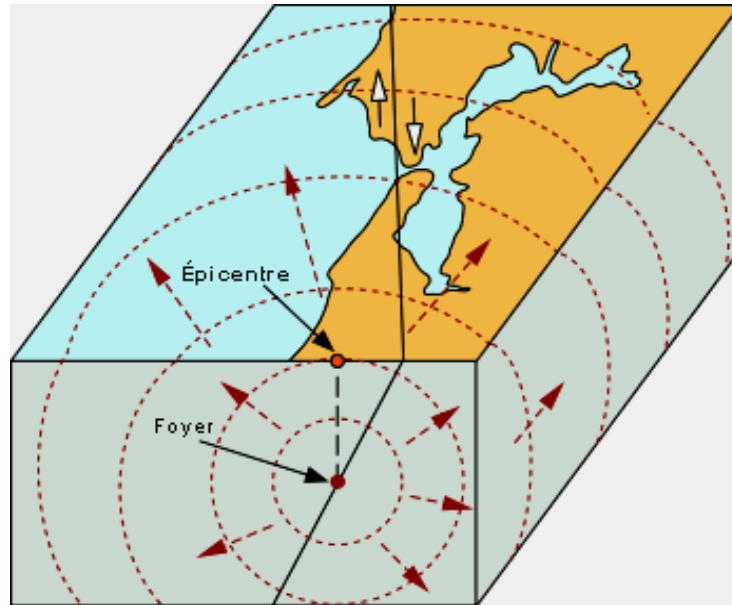


**Onde L (de Love)** (cisaillement)



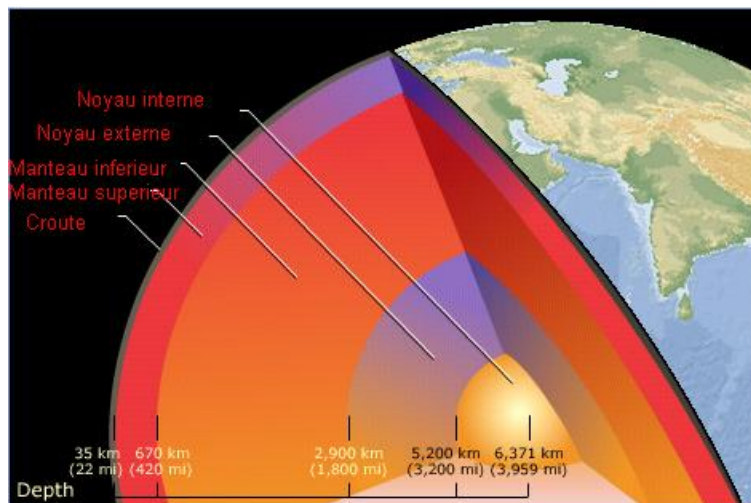
**Onde de Rayleigh**





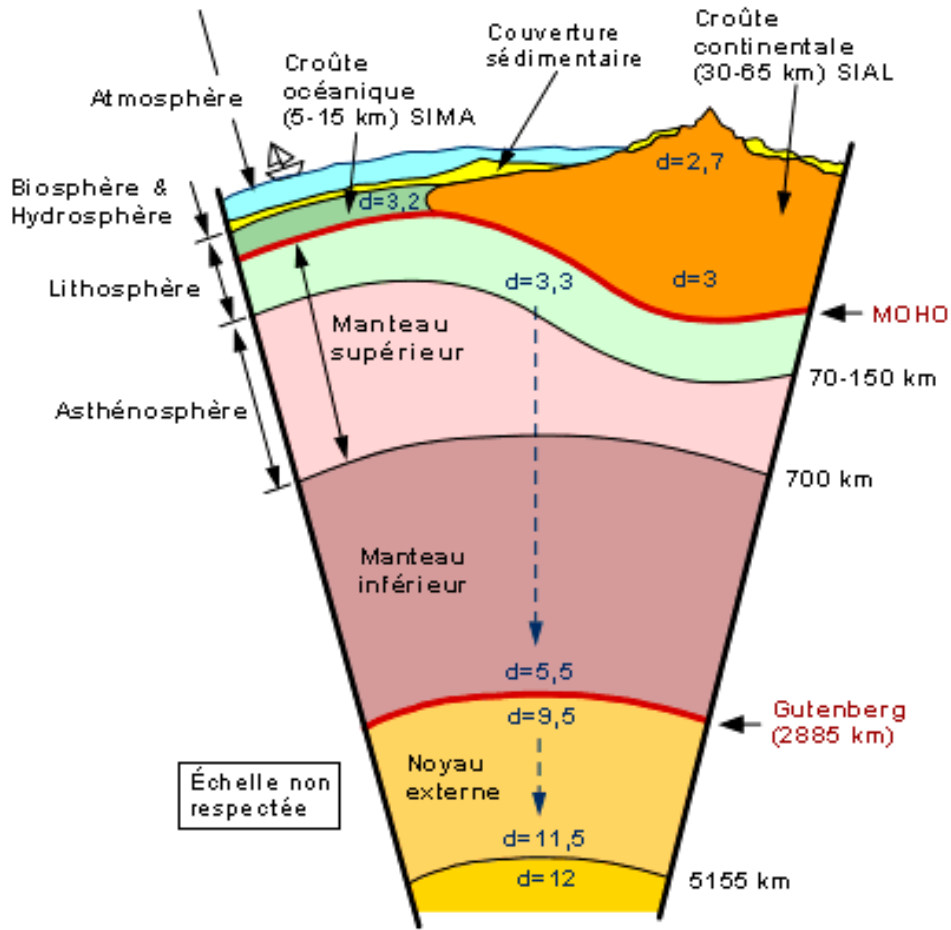
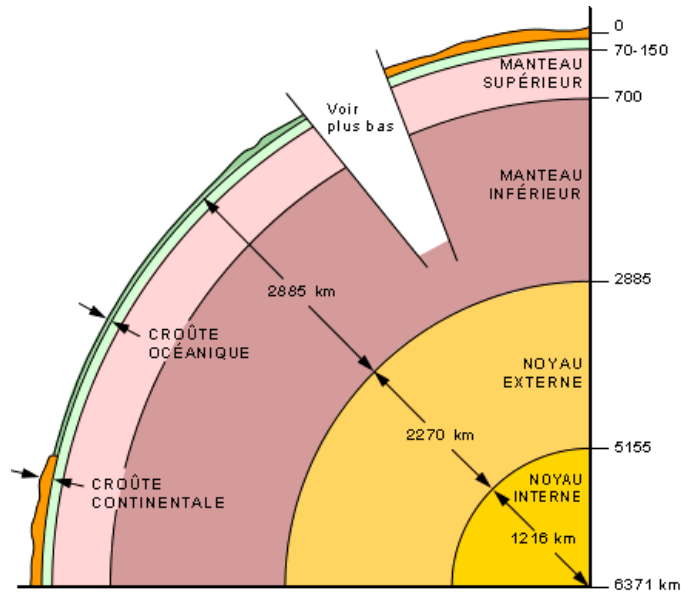
## L'intérieur de la Terre

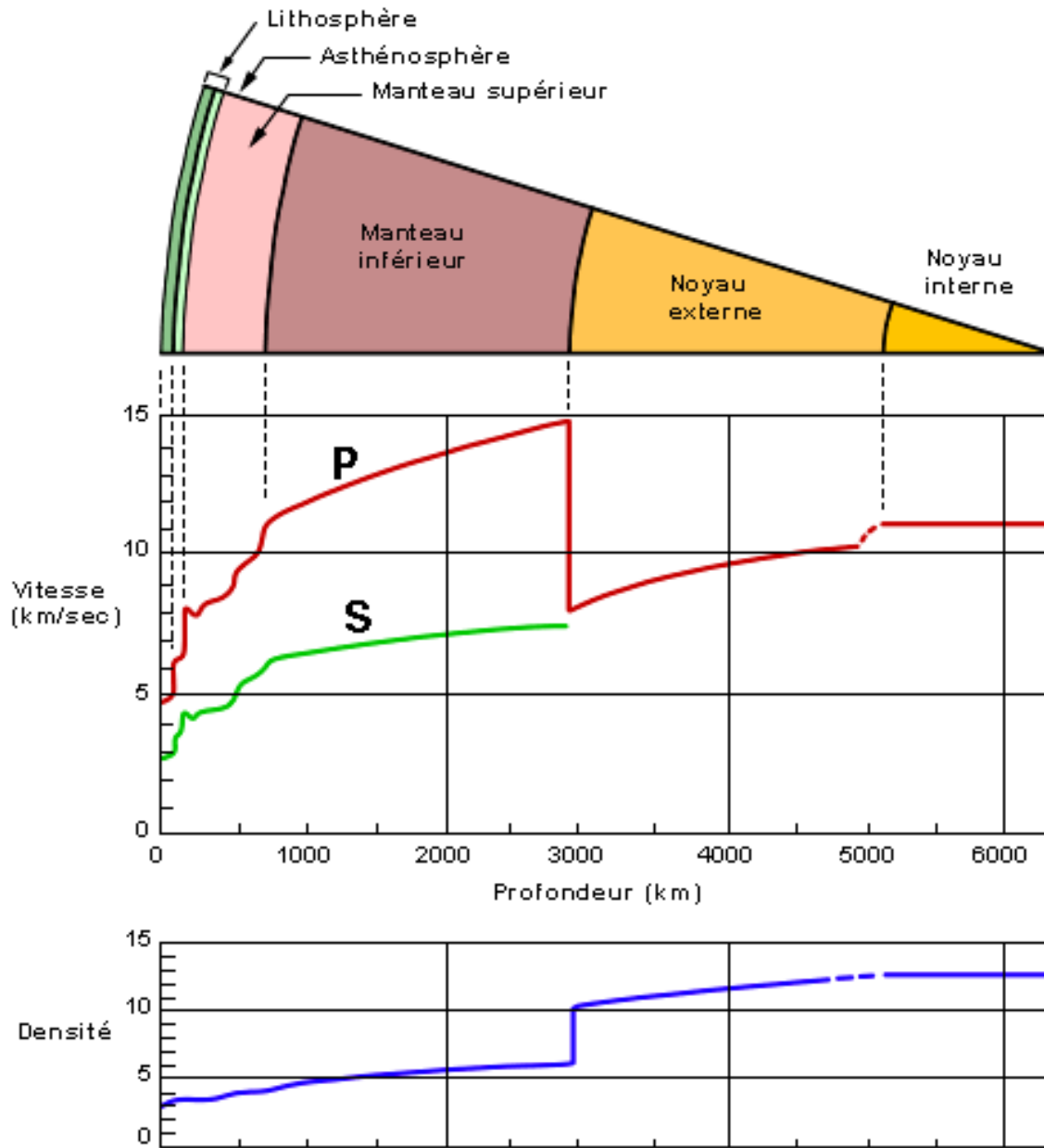
L'intérieur de la Terre est constitué d'une succession de couches, de propriétés physiques différentes. Au centre, le noyau, qui forme 17% du volume terrestre, et qui se divise en noyau interne solide et noyau externe liquide ; puis le manteau, qui constitue le gros du volume terrestre, 81%, et qui se divise en manteau inférieur solide et manteau supérieur principalement plastique, mais dont la partie tout à fait supérieure est solide; finalement, la croûte (ou écorce), qui compte pour moins de 2% en volume et qui est solide.



Deux discontinuités importantes séparent croûte, manteau et noyau : la discontinuité de Mohorovicie (moho) qui marque un contraste de densité entre la croûte terrestre et le

manteau, et la discontinuité de Gutenberg qui marque aussi un contraste important de densité entre le manteau et le noyau.





La couche plastique du manteau supérieur est appelée asthénosphère, alors qu'ensemble, les deux couches solides qui la surmontent, soit la couche solide de la partie supérieure du manteau supérieur et la croûte terrestre, forment la lithosphère.

On reconnaît deux types de croûte terrestre : la croûte océanique, celle qui en gros se situe sous les océans, et qui est formée de roches basaltiques de densité 3,2 et qu'on nomme aussi SIMA (silicium magnésium); et la croûte continentale, celle qui se situe au niveau des continents, et qui est plus épaisse à cause de sa plus faible densité (roches granitiques à intermédiaires de densité 2,7 à 3) et qu'on nomme SIAL (silicium aluminium). La couverture sédimentaire est une mince pellicule de sédiments produits et redistribués à la surface de la croûte par les divers agents d'érosion (eau, vent, glace) et qui compte pour très peu en volume.



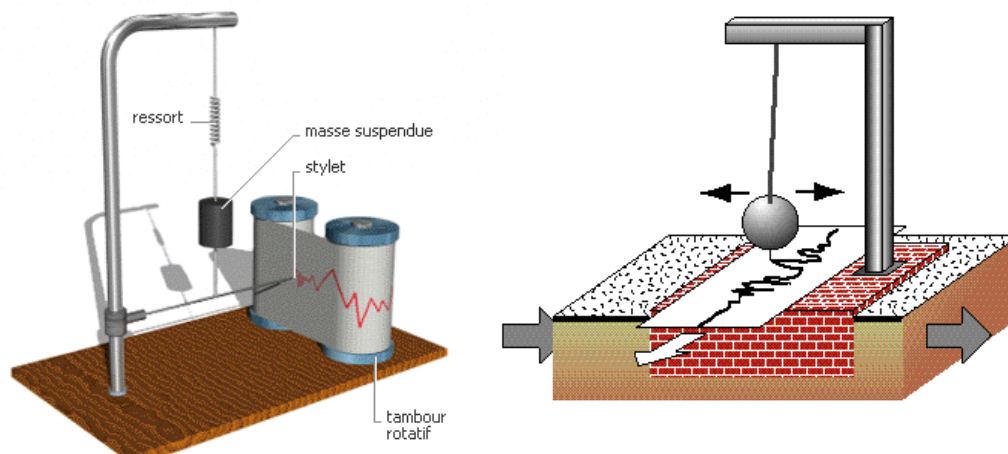
L'intérieur de la Terre est donc constitué d'un certain nombre de couches superposées, qui se distinguent par leur état solide, liquide ou plastique, ainsi que par leur densité. Une sorte d'échographie de l'intérieur de la Terre a été établie à partir du comportement des ondes sismiques lors des tremblements de terre. Les sismologues Mohorovicic et Gutenberg ont réussi à déterminer l'état et la densité des couches par l'étude du comportement de ces ondes sismiques. La vitesse de propagation des ondes sismiques est fonction de l'état et de la densité de la matière. Certains types d'ondes se propagent autant dans les liquides, les solides et les gaz, alors que d'autres types ne se propagent que dans les solides.

Lorsqu'il se produit un tremblement de terre à la surface du globe, il y a émission d'ondes dans toutes les directions. Il existe deux grands domaines de propagations des ondes : les ondes de surface, celles qui se propagent à la surface du globe, dans la croûte terrestre, et qui causent tous ces dommages associés aux tremblements de terre, et les ondes de fond, celles qui se propagent à l'intérieur de la terre et qui peuvent être enregistrées en plusieurs points du globe. Chez les ondes de fond, on reconnaît deux grands types : les ondes de cisaillement ou ondes S, et les ondes de compression ou ondes P.

### Mesure d'un tremblement de terre ?

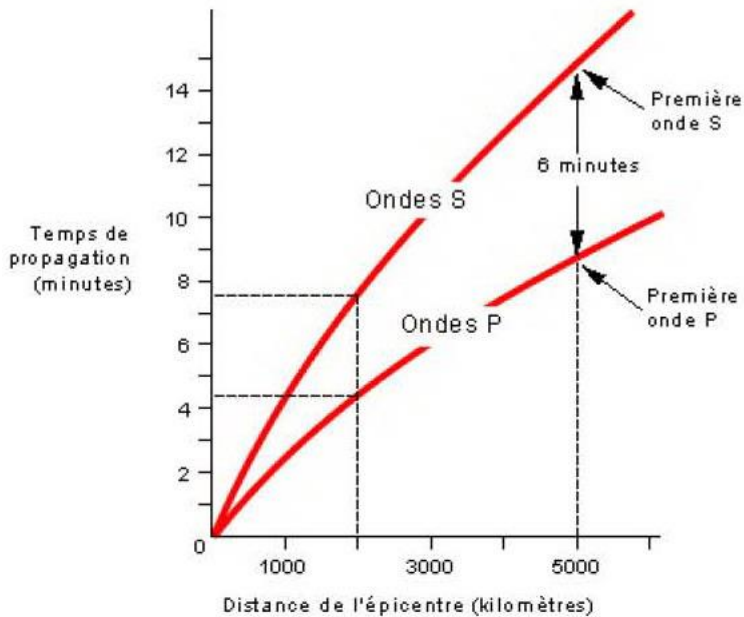
### Localisation d'un tremblement de terre à la surface de la planète ?

Les ondes P se propagent plus rapidement que les ondes S ; c'est cette propriété qui permet de localiser un séisme. Les ondes sismiques sont enregistrées en plusieurs endroits du globe par des appareils qu'on nomme sismographes.

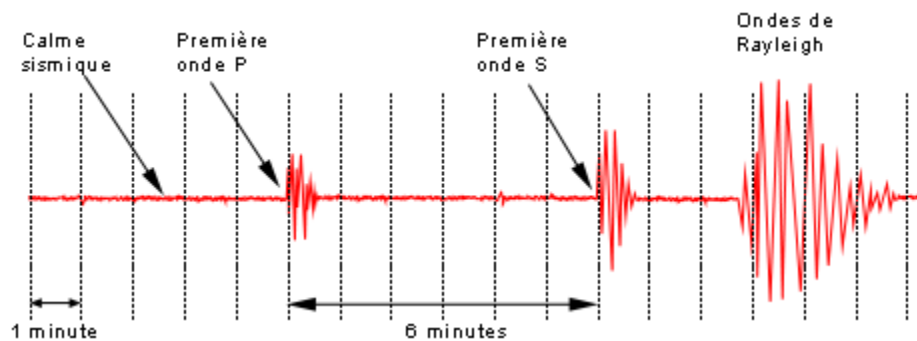


Encyclopédie Encarta, © Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

Un sismographe : appareil qui enregistre et mesure l'amplitude, l'heure et la durée des tremblements de terre. En gros, il s'agit d'un appareil capable de "sentir" les vibrations du roc; ces vibrations sont transmises à une aiguille qui les inscrit sur un cylindre qui tourne à une vitesse constante. On obtient un enregistrement du type de celui-ci.



En un lieu donné, comme les ondes P arrivent en premier, il y aura sur l'enregistrement sismographique un décalage entre le début d'enregistrement des deux types d'ondes ; ici par exemple, il y a un retard de 6 minutes des ondes S par rapport aux ondes P. Les vitesses de propagation des deux types d'ondes dans la croûte terrestre ont été établies et on possède par conséquent des courbes étalonnées, comme celle-ci.



### Enregistrement graphique produit par un sismographe.

Ce graphique nous dit, par exemple, que pour franchir une distance de 2000 kilomètres, l'onde P mettra 4,5 minutes, alors que l'onde S mettra 7,5 minutes pour parcourir la même distance; il y a un décalage de 3 minutes.

Pour un séisme donné, il s'agit de trouver à quelle distance sur ce graphique correspond le décalage obtenu sur l'enregistrement sismographique ; on obtient alors la distance entre le séisme et le point d'enregistrement. Dans notre exemple, la distance qui correspond à un décalage de 6 minutes est de 5000 km. Ceci ne nous donne cependant

pas le lieu du séisme à la surface du globe. Pour connaître ce point, il nous faut au moins trois enregistrements.



Dans cet exemple, considérons les enregistrements d'un séisme en trois points : Halifax, Vancouver et Miami. Les enregistrements indiquent que le séisme se situe dans un rayon de 560 Km d'Halifax, un rayon de 3900 Km de Vancouver et un rayon de 2500 Km de Miami. On situe donc le séisme au point d'intersection des trois cercles, soit à La Malbaie. En pratique, on utilise évidemment plus que trois points.

### Activité sismique et tectonique des plaques

Les foyers des séismes sont toujours situés dans la lithosphère cassante. Leur localisation à la surface du globe est très inégale : les vastes zones aismiques (absence de séismes) matérialisent les **plaques lithosphériques** ; elles sont séparées entre elles par d'étroites bandes où est localisée la presque totalité de la sismicité mondiale. Les séismes sont presque toujours associés aux **dorsales**, aux **fosses océaniques** et aux **chaînes de montagnes**. Les foyers se répartissent à plus ou moins grande profondeur :

- les séismes superficiels (jusqu'à 70 km de profondeur) se situent sur l'axe des dorsales et sous les chaînes de montagnes,
- les séismes intermédiaires entre 70 et 300 km de profondeur,
- Et les séismes profonds jusqu'à 700 km au niveau des fosses océaniques. Ils se situent sur un plan incliné, plan de Wadati- Benioff, indiquant la présence d'une **zone de subduction** où une plaque lithosphérique plonge dans le manteau.

On localise ainsi une vingtaine de plaques lithosphériques, les plus grandes étant l'Afrique, l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud, l'Antarctique, l'Australie, l'Eurasie et la Pacifique. L'étude des **mécanismes au foyer** permet de connaître le type de mouvement à l'origine du séisme et par suite de déterminer les mouvements relatifs des plaques. On répertorie le premier mouvement, **compression** ou **dilatation**, observé sur toutes les stations sismologiques sur une sphère entourant le foyer ; la projection de cette sphère en surface délimite des zones de compression et des zones de dilatation, séparées entre elles par le **plan de faille** et le plan auxiliaire, perpendiculaire au

précédent. Sur un sismogramme, si le premier pic est vers le haut (resp. vers le bas), le premier mouvement observé est un mouvement en compression (resp. en dilatation). On associe alors à chaque type de faille, un mécanisme au foyer :

- **les failles normales** résultent d'un mouvement d'étirement entre les deux blocs; elles se situent dans un contexte de **divergence** (cf. fig. 4).

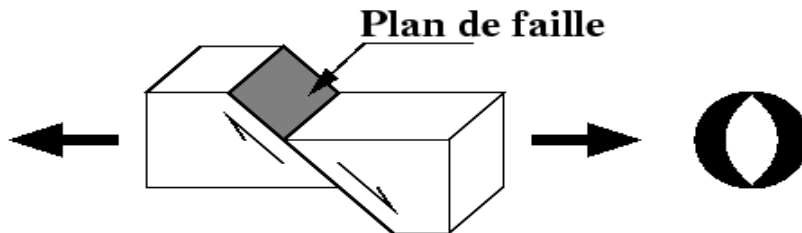


Figure 4 : Schéma d'une faille normale et mécanisme au foyer associé

- **les failles inverses** résultent d'un mouvement de compression entre les deux blocs; on les trouve dans des contextes de **convergence** (cf. fig. 5).

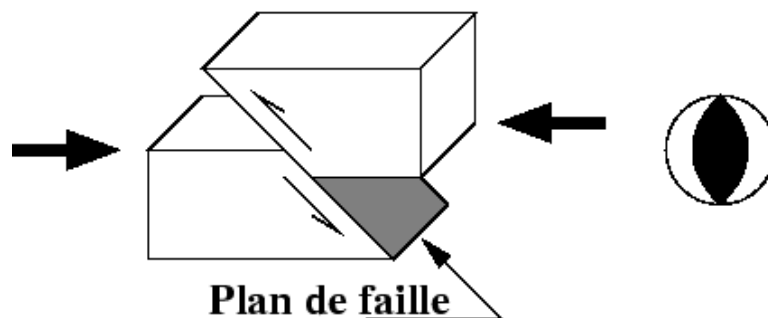


Figure 5 : Schéma d'une faille inverse et mécanisme au foyer associé

- **les failles en décrochement** résultent d'un **coulissage** des deux blocs l'un par rapport à l'autre; le mouvement est horizontal. Le décrochement est dextre (resp. senestre) si pour un observateur placé sur un des deux blocs, le mouvement relatif de l'autre bloc est vers la droite (resp. vers la gauche) (cf. fig. 6).

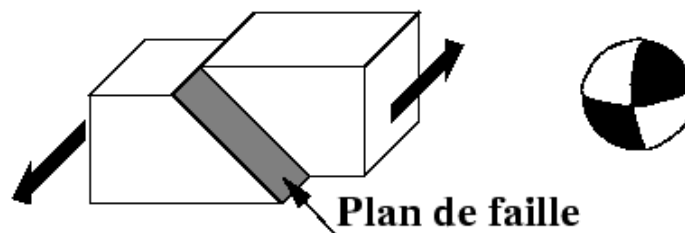
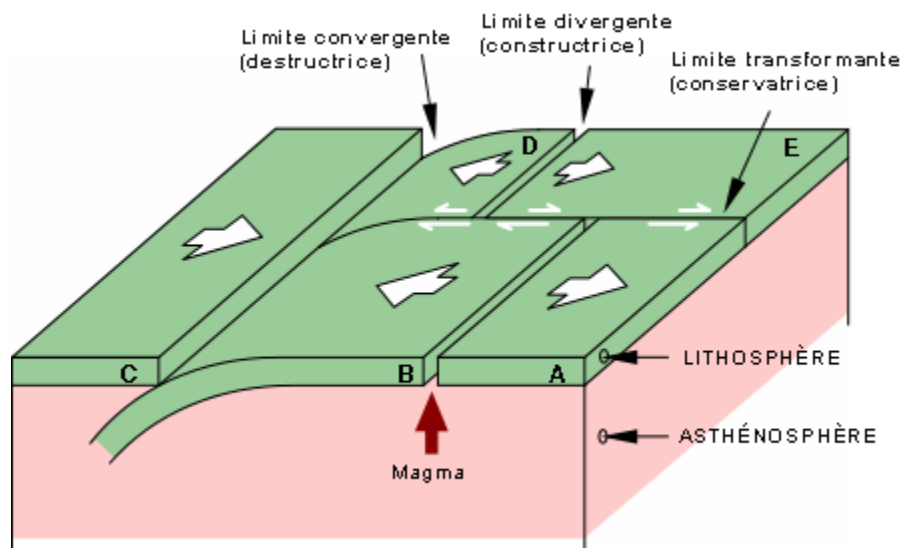
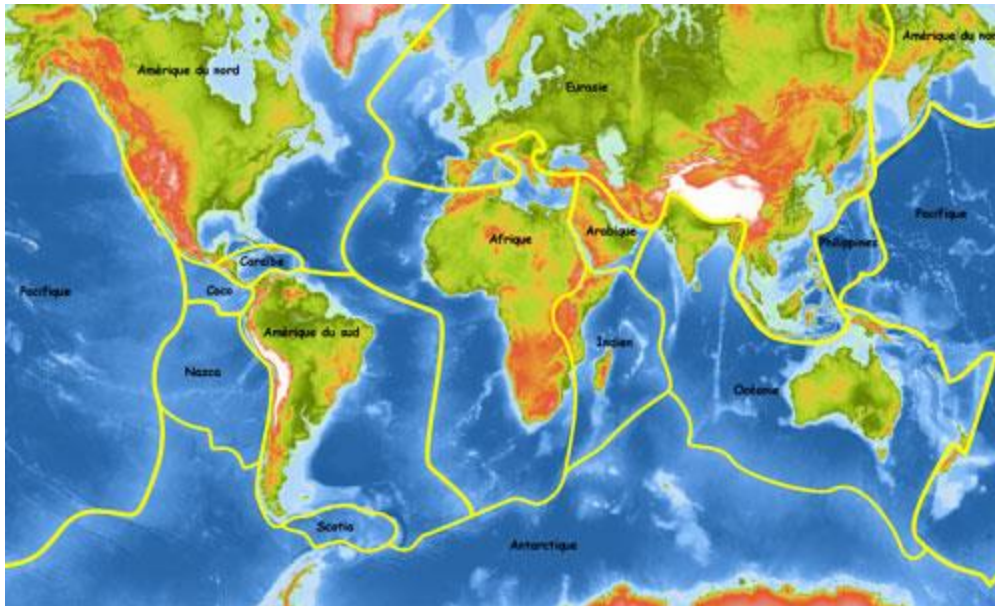


Figure 6 : Schéma d'une faille décrochante et mécanisme au foyer associé

## LA TECTOMIQUE DES PLAQUES



La **tectonique** est cette partie de la géologie qui étudie la nature et les causes des déformations des ensembles rocheux, plus spécifiquement dans ce cas-ci, les déformations, à grande échelle, de la lithosphère terrestre. Une **plaque** est un volume rigide, peu épais par rapport à sa surface. La **tectonique des plaques** est une théorie scientifique planétaire unificatrice qui propose que les déformations de la lithosphère sont reliées aux forces internes de la terre et que ces déformations se traduisent par le découpage de la lithosphère en un certain nombre de **plaques** rigides (14) qui bougent les unes par rapport aux autres en glissant sur l'asthénosphère.



Ces mouvements définissent trois types de frontières entre les plaques :

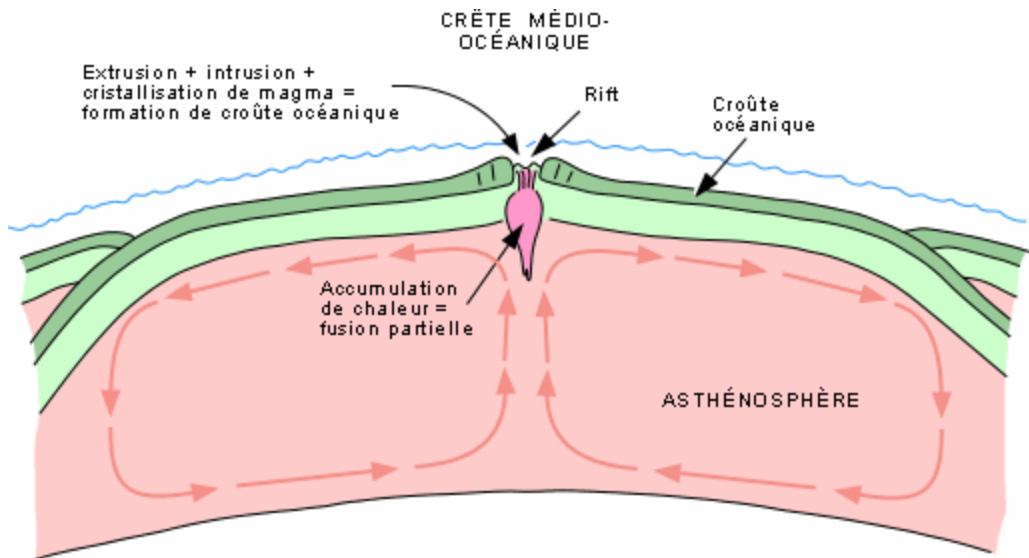
1) les frontières **divergentes**, là où les plaques s'éloignent les unes des autres et où il y a production de nouvelle croûte océanique ; ici, entre les plaques A et B, et D et E;

2) les frontières **convergentes**, là où les plaques entrent en collision, conséquence de la divergence ; ici, entre les plaques B et C, et D et C ;

3) les frontières **transformantes**, lorsque les plaques glissent latéralement les unes contre les autres le long de failles ; ce type de limites permet d'accommoder des différences de vitesses dans le déplacement de plaques les unes par rapport aux autres, comme ici entre A et E, et entre B et D, ou même des inversions du sens du déplacement, comme ici entre les plaques B et E.

### Les frontières divergentes

Nous savons qu'il existe un flux de chaleur qui va du centre vers l'extérieur de la terre, un flux causé par la désintégration radioactive de certains éléments chimiques dans le manteau et qui engendre des cellules de convection dans le manteau plastique (asthénosphère). A cause de cette convection, il y a concentration de chaleur en une zone où le matériel chauffé se dilate, ce qui explique le soulèvement correspondant à la dorsale océanique. La concentration de chaleur conduit à une fusion partielle du manteau qui produit du magma. La convection produite, dans la partie rigide de l'enveloppe de la terre (lithosphère), des forces de tension qui font que deux plaques divergent ; elle est le moteur du tapis roulant, entraînant la lithosphère océanique de part et d'autre de la dorsale. Entre ces deux plaques divergentes, la venue de magma crée de la nouvelle croûte océanique.

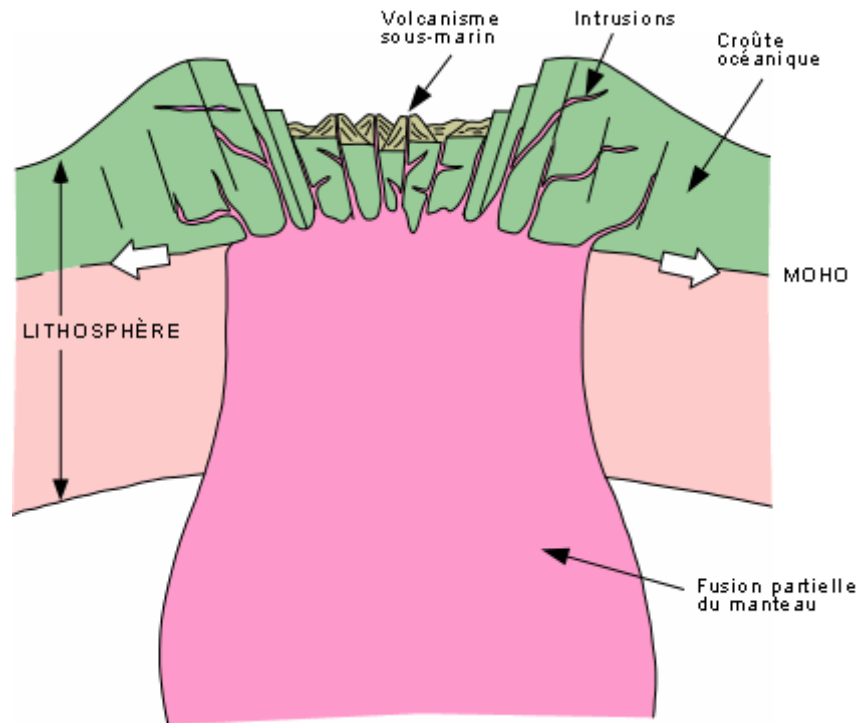


Le schéma suivant est un gros plan de la zone de divergence.

L'étalement des fonds océaniques crée dans la zone de dorsale, des tensions qui se traduisent par des failles d'effondrement et des fractures ouvertes, ce qui forme au milieu de la dorsale, un fossé d'effondrement qu'on appelle un rift océanique.

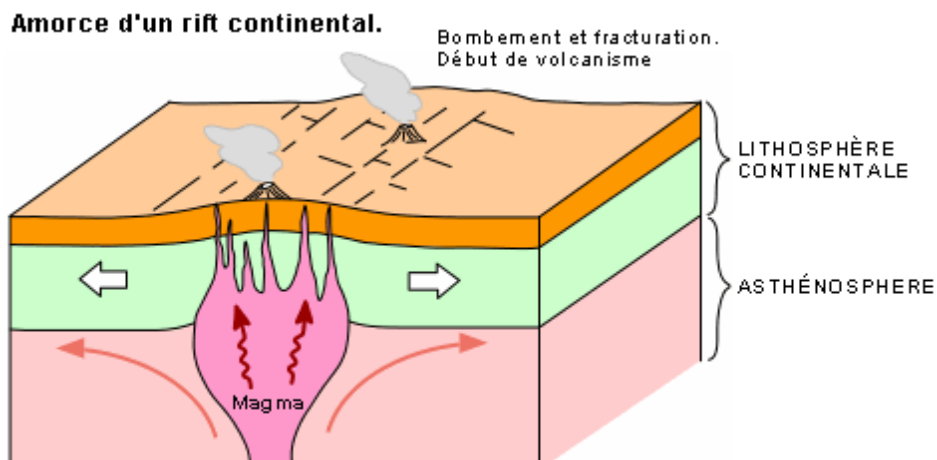
Le magma produit par la fusion partielle du manteau s'introduit dans les failles et les fractures du rift. Une partie de ce magma cristallise dans la lithosphère, alors qu'une autre est expulsée sur le fond océanique sous forme de lave et forme des volcans sous-

marins. C'est ce magma cristallisé qui forme de la nouvelle croûte océanique à mesure de l'étalement des fonds.



C'est donc ainsi qu'il se crée perpétuellement de la nouvelle lithosphère océanique aux niveaux des frontières divergentes, c'est-à-dire aux dorsales médio-océaniques. Ce sont ces processus qui expliquent comment s'est formé un océan comme l'Atlantique, ... une question chère à Wegener.

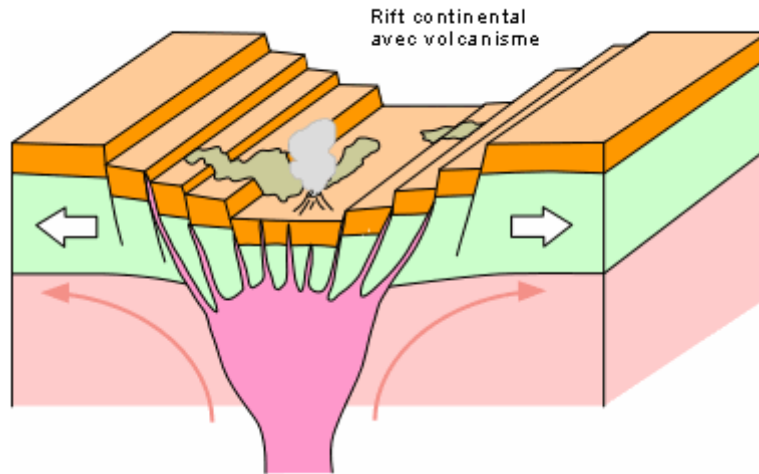
Les schémas qui suivent illustrent les quatre étapes de la formation d'un océan.



L'accumulation de chaleur sous une plaque continentale cause une dilatation de la matière qui conduit à un bombement de la lithosphère. Il s'ensuit des forces de tension

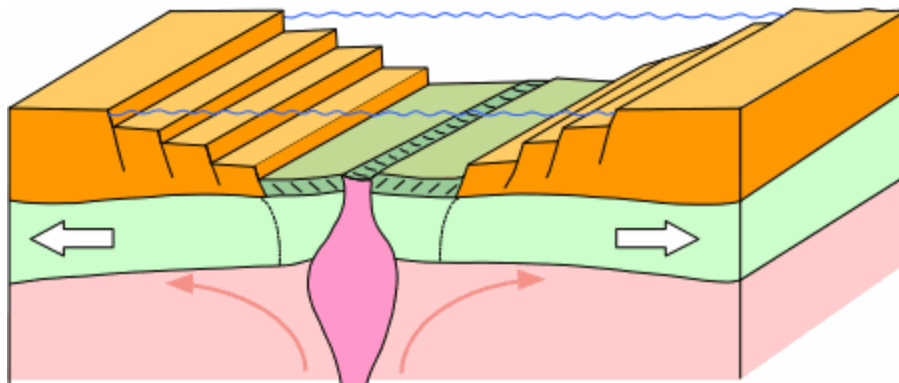
qui fracturent la lithosphère et amorcent le mouvement de divergence conduit par l'action combinée de la convection mantellique et la gravité. Le magma viendra s'infiltrer dans les fissures, ce qui causera par endroits du volcanisme continental ; les laves formeront des volcans ou s'écouleront le long des fissures. Un exemple de ce premier stade précurseur de la formation d'un océan est la [vallée du Rio Grande](#) aux USA.

### Rift continental.



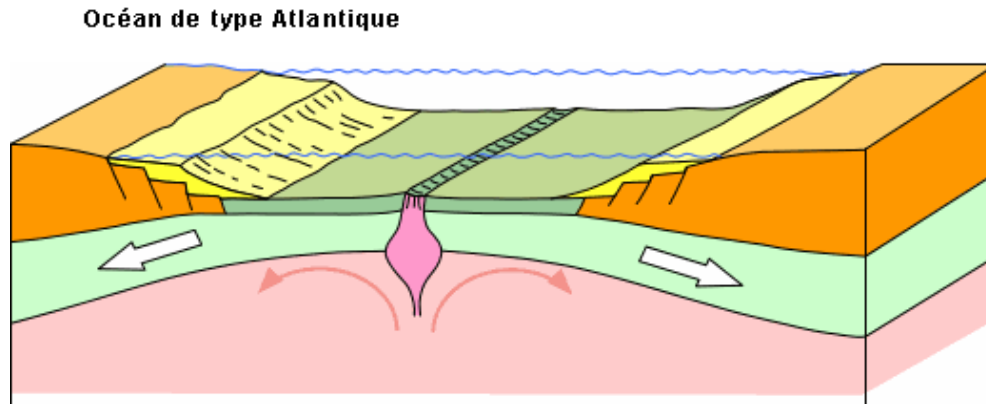
La poursuite des tensions produit un étirement de la lithosphère ; il y aura alors effondrement en escalier, ce qui produit une vallée appelée un rift continental. Il y aura des volcans et des épanchements de laves le long des fractures. Le [Grand Rift africain](#) en Afrique orientale en est un bon exemple.

### Premier plancher océanique - Mer linéaire.



Avec la poursuite de l'étirement, le rift s'enfonce sous le niveau de la mer et les eaux marines envahissent la vallée. Deux morceaux de lithosphère continentale se séparent et s'éloignent progressivement l'un de l'autre. Le volcanisme sous-marin forme un premier plancher océanique basaltique (croûte océanique) de part et d'autre d'une dorsale embryonnaire ; c'est le stade de mer linéaire, comme par exemple la [Mer Rouge](#).

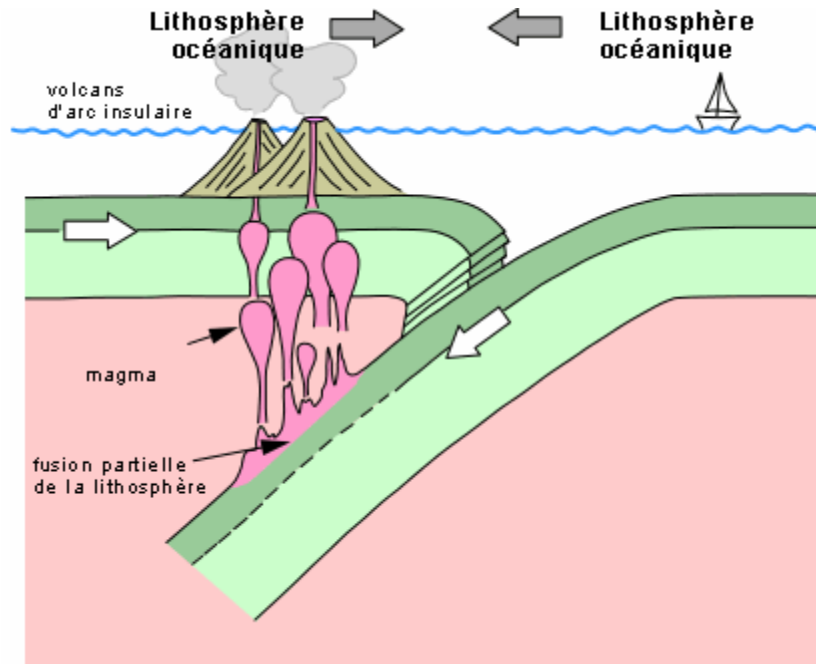
L'élargissement de la mer linéaire par l'étalement des fonds océaniques conduit à la formation d'un océan de type [Atlantique](#), avec sa dorsale bien individualisée, ses plaines abyssales et ses plateaux continentaux correspondant à la marge de la croûte continentale. Les dorsales océaniques constituent des zones importantes de dissipation de la chaleur interne de la Terre.



### **Les frontières convergentes**

Aujourd'hui, physiciens et astro-physiciens sont assez d'accord pour dire que la terre n'est pas en expansion comme le proposait Carey. Si la surface de la terre est un espace fini, le fait que les plaques grandissent aux frontières divergentes implique qu'il faudra détruire de la lithosphère ailleurs pour maintenir constante la surface terrestre. Cette destruction se fait aux frontières convergentes qui, comme le nom l'indique, marquent le contact entre deux plaques lithosphériques qui convergent l'une vers l'autre. La destruction de plaque se fait par l'enfoncement dans l'asthénosphère d'une plaque sous l'autre plaque, et par la digestion de la portion de plaque enfoncée dans l'asthénosphère. Les résultats (séismes, volcans, chaînes de montagnes, déformations ; voir à la section 1.3) diffèrent selon la nature des plaques (océaniques ou continentales) qui entrent en collision.

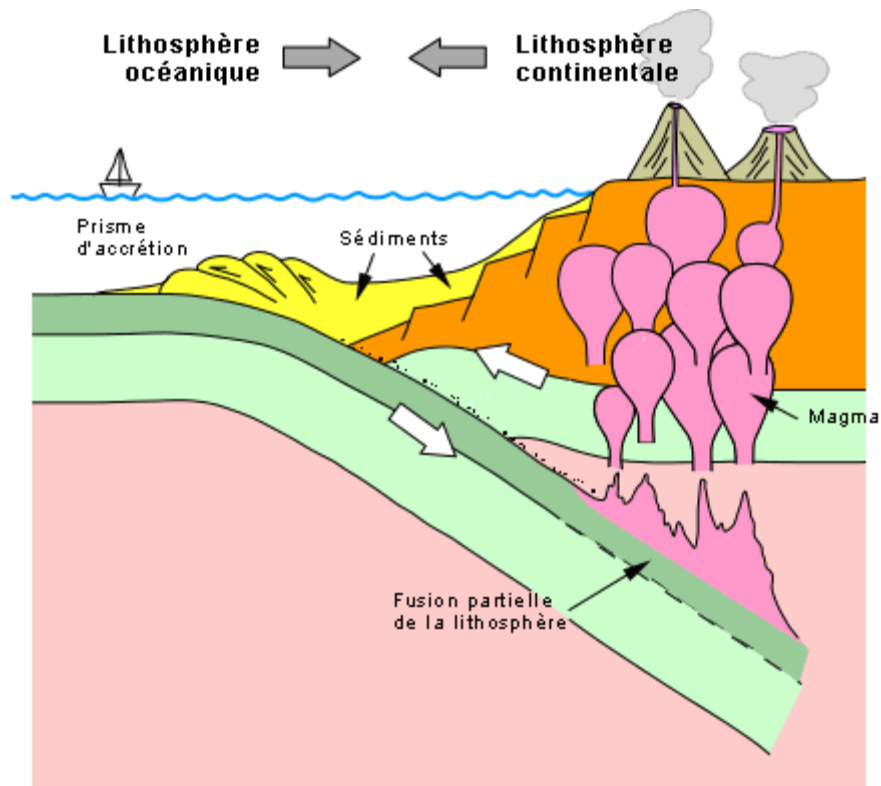




Un **premier type de collision** résulte de la convergence entre deux plaques océaniques. Dans ce genre de collision, une des deux plaques (la plus dense, généralement la plus vieille) s'enfonce sous l'autre pour former une zone de subduction (littéralement : conduire en- dessous).

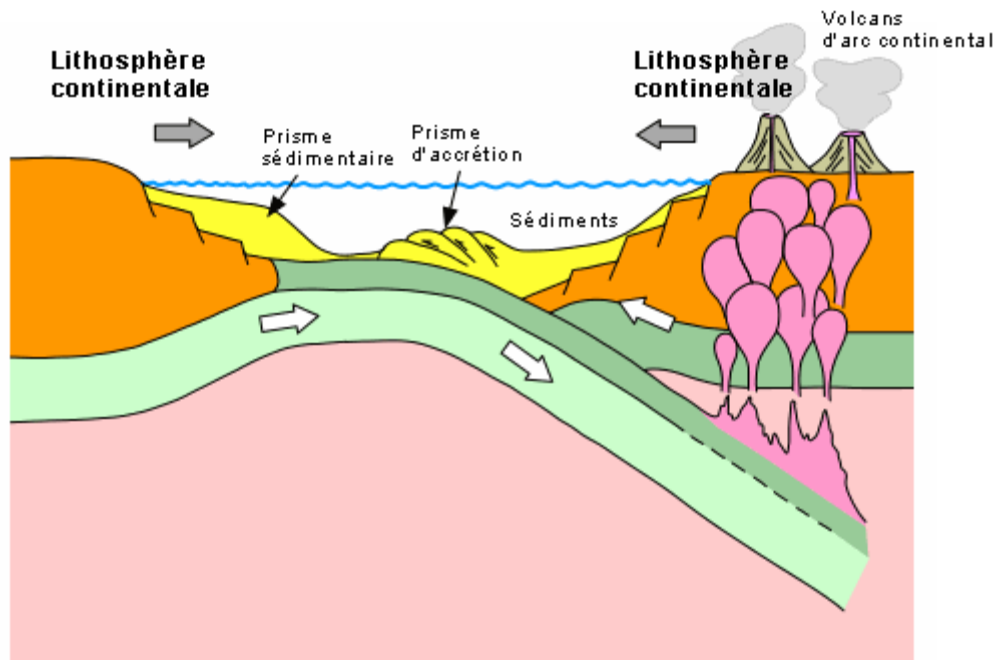
On enfonce du matériel moins dense ( $d \sim 3,2$ ) dans du matériel plus dense ( $d \sim 3,3$ ), du matériel moins chaud dans du matériel plus chaud. L'asthénosphère "digère" peu à peu la plaque lithosphérique. Il se produit un phénomène de fusion partielle de la plaque engloutie. Le magma résultant (liquide), moins dense que le milieu ambiant, monte vers la surface. Une grande partie de ce magma reste emprisonnée dans la lithosphère, mais une partie est expulsée à la surface, produisant des volcans sous la forme d'une série d'îles volcaniques (arc insulaire volcanique) sur le plancher océanique. De bons exemples de cette situation se retrouvent dans le [Pacifique](#)- Ouest, avec les grandes fosses des Mariannes, de Tonga, des Kouriles et des Aléoutiennes, chacune possédant leur arc insulaire volcanique, ainsi que la fosse de Puerto Rico ayant donné naissance à l'arc des Antilles bordant la mer des Caraïbes [Atlantique](#).

Un **second type de collision** est le résultat de la convergence entre une plaque océanique et une plaque continentale. Dans ce type de collision, la plaque océanique plus dense s'enfonce sous la plaque continentale.



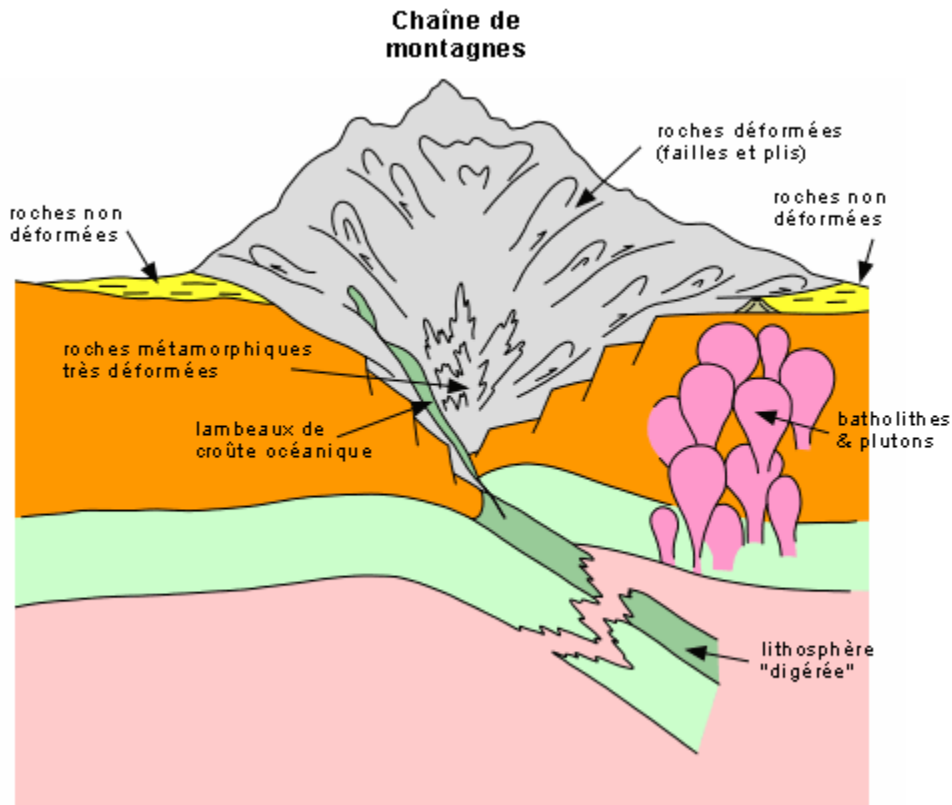
Les basaltes de la plaque océanique et les sédiments du plancher océanique s'enfoncent dans du matériel de plus en plus dense. Rendue à une profondeur excédant les 100 km, la plaque est partiellement fondue. Comme dans le cas précédent, la plus grande partie du magma restera emprisonnée dans la lithosphère (ici continentale); le magma qui aura réussi à se frayer un chemin jusqu'à la surface formera une chaîne de volcans sur les continents (arc volcanique continental). De bons exemples de cette situation se retrouvent à la marge du Pacifique- Est, comme les volcans de la [Chaîne des Cascades](#) (*Cascade Range*) aux USA (incluant le Mont St. Hellens) résultat de la subduction dans la fosse de Juan de Fuca et ceux de la [Cordillères des Andes](#) en Amérique du Sud reliés à la fosse du Pérou- Chili. Dans une phase avancée de la collision, le matériel sédimentaire qui se trouve sur les fonds océaniques et qui est transporté par le tapis roulant vient se concentrer au niveau de la zone de subduction pour former un prisme d'accrétion.

Un **troisième type de collision** implique la convergence de deux plaques continentales. L'espace océanique se refermant au fur et à mesure du rapprochement de deux plaques continentales, le matériel sédimentaire du plancher océanique, plus abondant près des continents, et celui du prisme d'accrétion se concentrent de plus en plus ; le prisme croît.



Lorsque les deux plaques entrent en collision, le mécanisme se coince : le moteur du déplacement (la convection dans le manteau supérieur et la gravité) n'est pas assez fort pour enfoncer une des deux plaques dans l'asthénosphère à cause de la trop faible densité de la lithosphère continentale par rapport à celle de l'asthénosphère. Tout le matériel sédimentaire est comprimé et se soulève pour former une chaîne de montagnes où les roches sont plissées et faillées. Des lambeaux de la croûte océanique peuvent même être coincés dans des failles. C'est la soudure entre deux plaques continentales pour n'en former qu'une seule.

Toutes les grandes chaînes de montagnes plissées ont été formées par ce mécanisme. Un bon exemple récent de cette situation, c'est la soudure de l'Inde au continent asiatique, il y a à peine quelques millions d'années, avec la formation de [l'Himalaya](#).



### Les frontières transformantes

Les frontières transformantes correspondent à de grandes fractures qui affectent toute l'épaisseur de la lithosphère ; on utilise plus souvent le terme de failles transformantes. Elles se trouvent le plus souvent, mais pas exclusivement, dans la lithosphère océanique. Ces failles permettent d'accommoder des différences dans les vitesses de déplacement ou même des mouvements opposés entre les plaques, ou de faire le relais entre des limites divergentes et convergentes (ces failles transforment le mouvement entre divergence et convergence, de là leur nom de failles transformantes).

La fameuse faille de San Andreas en Californie est un bon exemple de cette situation : elle assure le relais du mouvement entre la limite divergente de la dorsale du Pacifique-Est, la limite convergente des plaques Juan de Fuca- Amérique du Nord et la limite divergente de la dorsale de Juan de Fuca.

Elle affecte à la fois la lithosphère océanique et la lithosphère continentale. Elle constitue la limite entre trois plaques : plaque de Juan de Fuca, plaque de l'Amérique du Nord et plaque du Pacifique. Elle présente aussi l'inconvénient de traverser la ville de San Francisco ! Au rythme actuel du déplacement (~ 5,5 cm/an), la ville de Los Angeles sera au droit de San Francisco dans 10 Ma.

**Aujourd'hui**



**Dans 10 millions d'années**



**A quel rythme se font ces mouvements de divergence et de convergence?**

Les taux de divergence et de convergence ne sont pas identiques partout. La divergence varie de 1,8 à 4,1 cm/an dans l'Atlantique et de 7,7 à plus de 18 cm/an dans le Pacifique. La convergence se fait à raison de 3,7 à 5,5 cm/an dans le Pacifique. À noter le taux de déplacement latéral relatif le long de la faille de San Andreas en Californie (~ 5,5 cm/an).

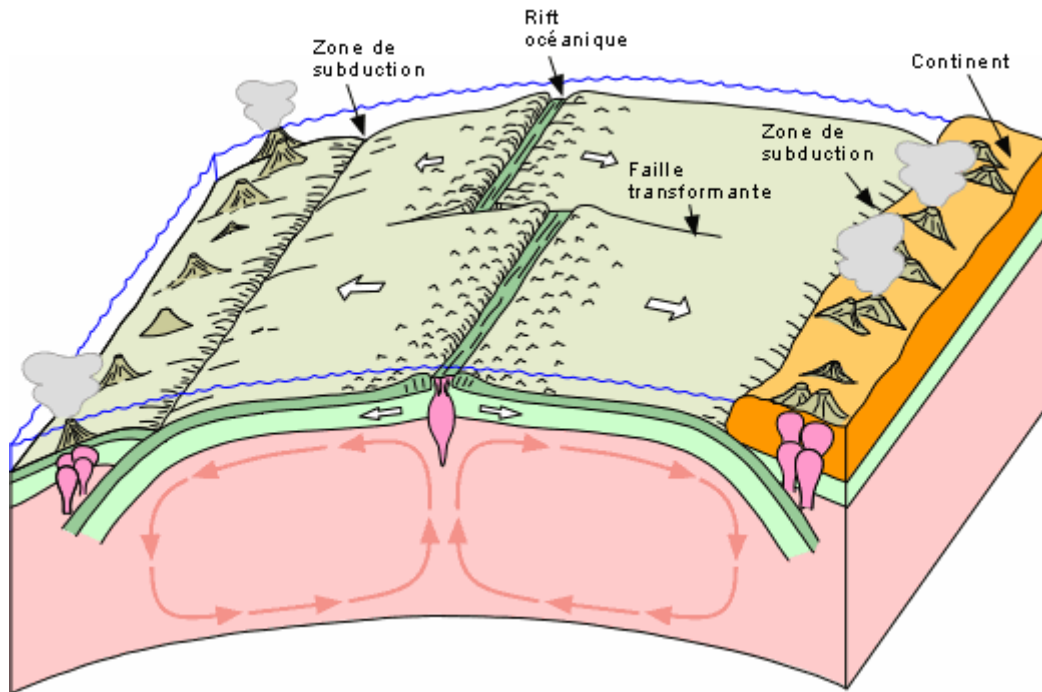
**En résumé ...**

La terre est un système où toutes les pièces, tous les éléments, forment une grande machine mue par la thermodynamique.

**Le moteur de la tectonique des plaques** : Le moteur est constitué par l'action combinée de la gravité terrestre et des grandes cellules de convection dans le manteau résultant du flux de chaleur qui va du centre vers l'extérieur de la terre, un flux de chaleur qui est relié à la décomposition des éléments radioactifs contenus dans les minéraux constitutifs du manteau. Ces cellules concentrent de la chaleur dans leur partie ascendante, ce qui cause une fusion partielle du manteau tout à fait supérieur et une expansion des matériaux. C'est cette expansion qui produit une dorsale médio-océanique linéaire\*. L'écoulement de l'asthénosphère sous la lithosphère rigide entraîne cette dernière ; il en découle des tensions au niveau de la dorsale, causant la



divergence et le magmatisme associé. Ainsi, il y a formation continue de nouvelle lithosphère océanique au niveau de la dorsale et élargissement progressif de l'océan. En contrepartie, puisque le globe terrestre n'est pas en expansion, il faut détruire de la lithosphère, ce qui se fait par enfoncement de lithosphère océanique dans les zones de subduction qui correspondent aux fosses océaniques profondes pouvant atteindre les 11 km (fosse des Mariannes). Les dorsales sont disséquées par des failles dites transformantes pour accommoder des différences de vitesses de divergence.



### **Les sources d'énergie interne de la Terre**

La principale source d'énergie provient de la désintégration naturelle d'**éléments radioactifs** tels l'uranium, le thorium, le potassium, présents dans toutes les enveloppes jusqu'au noyau. Cette énergie, de nature **nucléaire**, produit essentiellement de la chaleur. Une autre source d'énergie est la **chaleur « primitive »** de la terre. Lors de sa formation dans le système solaire par accrétion de matières entrant en collision, il y a eu fusion sous la force des impacts. Depuis, la Terre s'est refroidie en surface, au contact de l'espace interplanétaire froid mais le centre de la planète conserve des zones encore en fusion à plus de 3 000 °C à la limite du manteau et du noyau.

**Les manifestations de l'énergie interne de la Terre** : Le **flux géothermique** est la quantité de chaleur émise et perdue par la Terre, par unité de surface. Il est perceptible et mesurable lorsque l'on s'enfonce dans la Terre à l'occasion de forages ou dans les mines : la **température** augmente avec la profondeur à raison de 30 °C en moyenne par km. Le flux géothermique est beaucoup plus élevé au niveau des zones actives de la planète : dorsales océaniques et autres **zones volcaniques**.

**Le champ magnétique terrestre** : La Terre possède un champ magnétique que l'on appelle aussi **champ géomagnétique**. Il est dû aux **mouvements de roches en fusion** (le **magma**) à l'intérieur du **noyau terrestre**, qui se trouve au centre de la Terre. Ces mouvements font que le globe terrestre se comporte comme un **énorme aimant**.

## COMMENT SE FORME LE CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE ?

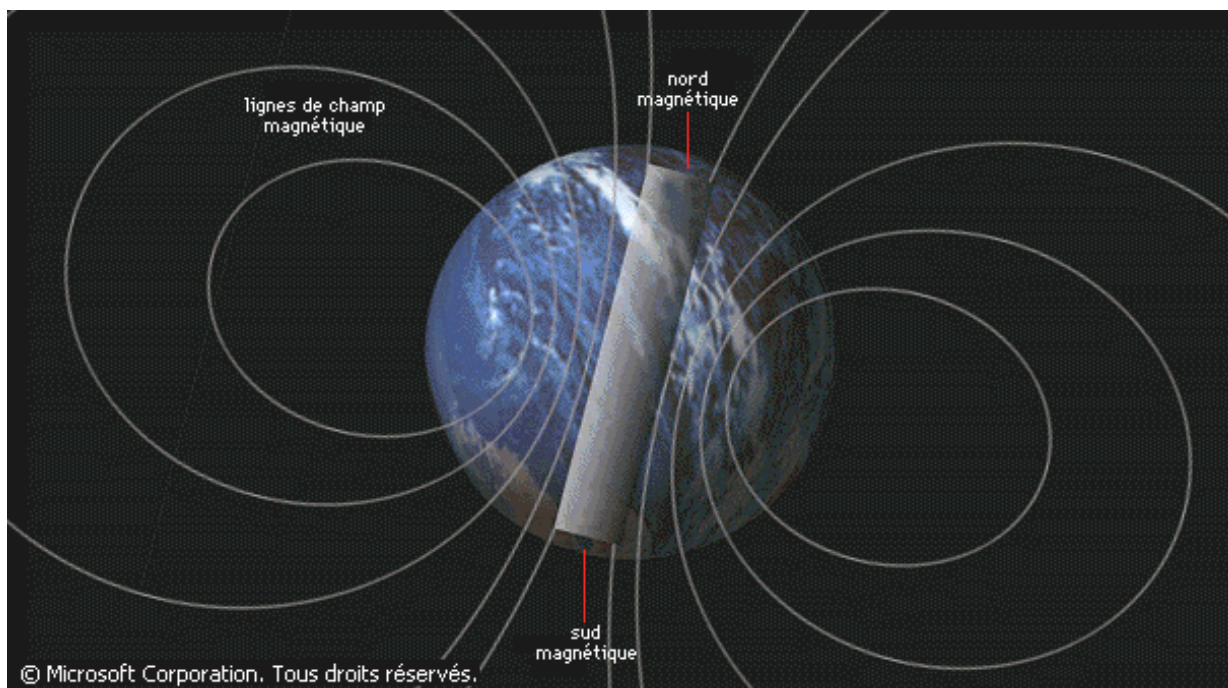
Le magnétisme terrestre est lié au noyau qui se situe au centre de la Terre. Le champ magnétique n'est pourtant pas dû au fer qui compose le noyau, car le fer ne se comporte plus comme un aimant à la température où il se trouve au cœur de la Terre (jusqu'à 6 650 °C). Le magnétisme est provoqué par le **mouvement du magma métallique** dans le **noyau externe (liquide)** qui tourne autour du **noyau interne (solide)**. L'intensité du champ magnétique varie en fonction de l'endroit où l'on se trouve à la surface de la Terre. Il est par exemple plus faible au niveau de l'équateur. Le champ géomagnétique se mesure avec un instrument appelé **magnétomètre** ; son intensité moyenne est de 0,00005 T (teslas).

## COMMENT PEUT-ON OBSERVER LE CHAMP MAGNÉTIQUE À LA SURFACE DE LA TERRE ?

Les hommes utilisent depuis longtemps des **boussoles** pour s'orienter à la surface du globe. Une boussole indique la direction des **pôles magnétiques**, qui ne correspondent pas aux **pôles géographiques**. Par exemple, le pôle nord magnétique est actuellement situé dans le nord du Canada, à plus de 1 500 km du pôle Nord géographique.

Une autre technique d'observation du champ magnétique terrestre consiste à observer les **aurores polaires** (phénomène lumineux spectaculaire dû aux collisions entre des particules très énergétiques provenant du Soleil et les molécules de gaz de l'atmosphère). Les aurores polaires se produisent aux pôles (Sud et Nord), où elles prennent la forme de vagues colorées qui suivent les lignes du champ magnétique terrestre.

## À QUOI SERT LE CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE ?



## **Le champ magnétique terrestre**

Le champ magnétique se fait ressentir jusqu'à une très haute altitude, dans une région appelée **magnétosphère** (altitude supérieure à 1 000 km). La magnétosphère protège la Terre du **vent solaire** (particules très énergétiques émises par le Soleil) puisqu'elle oriente le rayonnement solaire le long des lignes du champ magnétique terrestre. L'arrêt des particules solaires est plus efficace à l'équateur qu'au niveau des pôles (comme en témoigne l'existence des aurores polaires). La magnétosphère sert donc de **bouclier naturel** à la Terre.

Depuis l'invention de la boussole, les hommes savent que la Terre est baignée dans un champ magnétique naturel. Ce champ magnétique est dû aux mouvements de magma métallique (des roches en fusion) au centre de la Terre. La forme du champ magnétique terrestre est approximativement la même que celle d'un aimant classique, avec un pôle Sud et un pôle Nord.