

1 Structures et dimensions

1.1 Les planètes

Les planètes¹ sont des amas de matières (solides et gazeux, plus rarement liquide) associés par la gravitation. Du fait de la gravitation, la forme des planètes est plus ou moins sphérique. Généralement, ces planètes orbitent autour de une ou plusieurs étoiles.

Il y a 8 planètes dans le système solaire. Le tableau ci-dessous les reprend le Soleil, les planètes du système solaire et certaines de leur caractéristique. Une unité astronomique (u.a.) vaut la distance Terre-Soleil soit 150 000 000 km (précisément 149 597 870 km). Au niveau astronomique, on exprime souvent les distances en temps-lumière, c-à-d en temps nécessaire pour la lumière d'aller d'un point A à un point B².

A ce jour, 4 777 exoplanètes³ ont été détectées dans 3 534 systèmes stellaires différents.

Astre	Type	Diamètre moyen	Période de révolution	Rayon orbital moyen	
		en kilomètre		en u.a	en temps lumière
Soleil	Plasma	1 392 684	/	/	/
Mercuré	Rocheuse	4 879	88 jours	0,387	3,22 minutes
Vénus	Rocheuse	12 104	225 jours	0,723	6,02 minutes
Terre	Rocheuse	12 742	365,25 jours	1	8,33 minutes
Mars	Rocheuse	6 779	687 jours	1,524	12,7 minutes
Jupiter	Gazeuse	139 822	11,86 années	5,202	43,33 minutes
Saturne	Gazeuse	116 464	29,44 années	9,536	1 heure 19 minutes
Uranus	Gazeuse	50 724	84,05 années	19,2	2 heures 40 minutes
Neptune	Gazeuse	49 244	164,86 années	30,07	4 heures 10 minutes

D'autres objets orbitent autour du Soleil, on peut citer :

- la ceinture principale d'astéroïdes se trouve entre les orbites de Mars et Jupiter ; on y a recensé plus de 700 000 astéroïdes de plus de 1 km, 240 astéroïdes de plus de 100 km et une planète naine d'un diamètre de 950 km : Cérès.
- la ceinture de Kuiper est un anneau d'astéroïdes situé après Neptune entre 30 et 55 u.a. du Soleil, à l'inverse de la ceinture principale est composée de matériaux volatiles gelés (méthane, ammoniac et eau) ; elles comportent 4 planètes naines Pluton, Hauméa, Eris et Makémaké, respectivement d'un diamètre de 2 370 km, 2000 km, 2326 km et 1 430 km.
- les comètes sont majoritairement des astéroïdes transneptuniens (quelques unes sont interstellaires, et donc ne font qu'un passage) ayant une orbite extrêmement elliptique, la queue des comètes est opposée au Soleil, car générée par les vents solaires.

1. d'origine grecque, le mot « planète » signifie « astre errant » car si l'on regarde la voûte céleste, elles ne suivent pas le parcours des autres objets qui semble tourner du fait de la rotation terrestre.

2. La vitesse de la lumière est constante dans le vide et vaut 300 000 km/s.

3. planètes extérieures au système solaire.

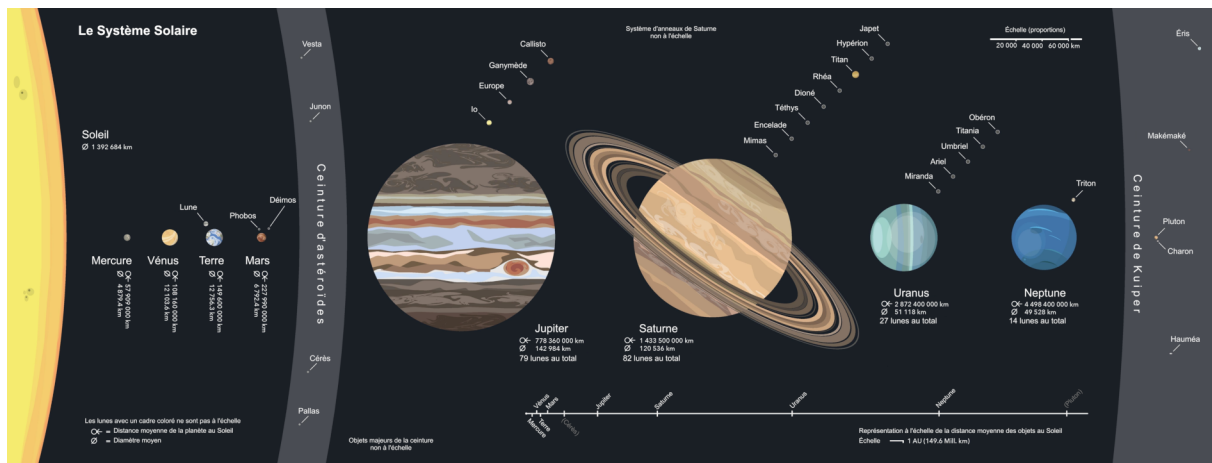


FIGURE 1 – Système solaire

1.2 Les systèmes stellaires

Le Soleil est une étoile. Le système solaire est donc un système stellaire.

La majorité des étoiles sont des naines rouges (cfr. 3.5.2) difficilement observables.

De nombreux systèmes stellaires sont des systèmes binaires (deux étoiles tournant l'une autour de l'autre), ou même ternaire (composés de trois étoiles).

On distingue plusieurs types d'étoiles (cfr. 3).

L'objet connu dont l'orbite est la plus éloignée du Soleil est Farout⁴, une planète mineure de +/- 500 km de diamètre dont l'orbite la plus lointaine serait à 120 u.a. (soit +/- 16 heures et 40 minutes lumière).

Sur base de la composition du système solaire, le soleil est une étoile de 2ème ou 3ème génération.

Le système stellaire le plus proche est Proxima du Centaure, une naine rouge à 4,24 années-lumières.

1.3 Les galaxies

Les galaxies ont été observées pour la première à la fin du XIXème siècle (alors appelées « nébuleuse »-sans l'adjectif planétaire-).

Dans les années 1920, le terme a été utilisé pour désigner des rassemblements d'étoiles attirés par leur gravitation⁵. A l'origine, il ne s'agit que d'un synonyme de « Voie Lactée ».

On sait maintenant qu'au centre de toute galaxie, il y a probablement un trou noir supermassif⁶.

Le Soleil est une des étoiles de la Voie Lactée. La Voie Lactée est une galaxie spirale issue de la fusion de au moins 2 galaxies, il y a 10 milliards d'années.

Le Soleil se trouve sur le bras d'Orion à plus ou moins 2/3 tiers de la distance du centre de la Voie Lactée.

La Terre fait donc partie de la Voie Lactée.

La dimension de la Voie Lactée vaut approximativement 100 000 années-lumières.

4. « far out », de son vrai nom 2018VG₁₈.

5. L'idée avait pourtant été émise par : Abū Rayhān al-Bīrūnī, un astronome perse vers l'an 1000 ou également par Emmanuel Kant, le philosophe, au XVIIIème siècle.

6. dont la masse dépasse un million de fois la masse du Soleil.

1.4 Les amas de galaxies

Depuis 1930, il a été observé que les galaxies se concentrent dans certains endroits de l'Univers. On appelle ces endroits des amas de galaxies. Ces amas de galaxies, concentrés parfois en super-amas, sont connectés entre eux par des filaments de matières.

La Voie Lactée fait partie d'un amas appelé « Groupe Local », lui même composant du super-amas de la Vierge (appelé aussi « Super-amas Local »).

1.5 L'Univers

Sur base des observations actuelles, on estime le mur de Planck⁷ à 13,7 milliard d'années et le diamètre de l'Univers observable⁸ à 93 milliards d'années-lumière.

On peut s'étonner que la taille de cet Univers est supérieur à l'origine temporelle du Big-Bang. Ceci est directement dû à l'expansion de l'Univers. La taille de l'Univers continue à augmenter. Par exemple, l'objet le plus éloigné connu est la galaxie *GN-z11*. Nous voyons cette galaxie telle qu'elle était il y a 13,4 milliards (soit 400 millions d'années après le Big-Bang). Pourtant, cette galaxie ne se trouve plus au même endroit et a une composition stellaire différente de se que l'on observe actuellement. *GN-z11* se trouve maintenant à plus de 32 milliards d'années-lumière.

Plus on voit loin, plus on voit dans le passé.

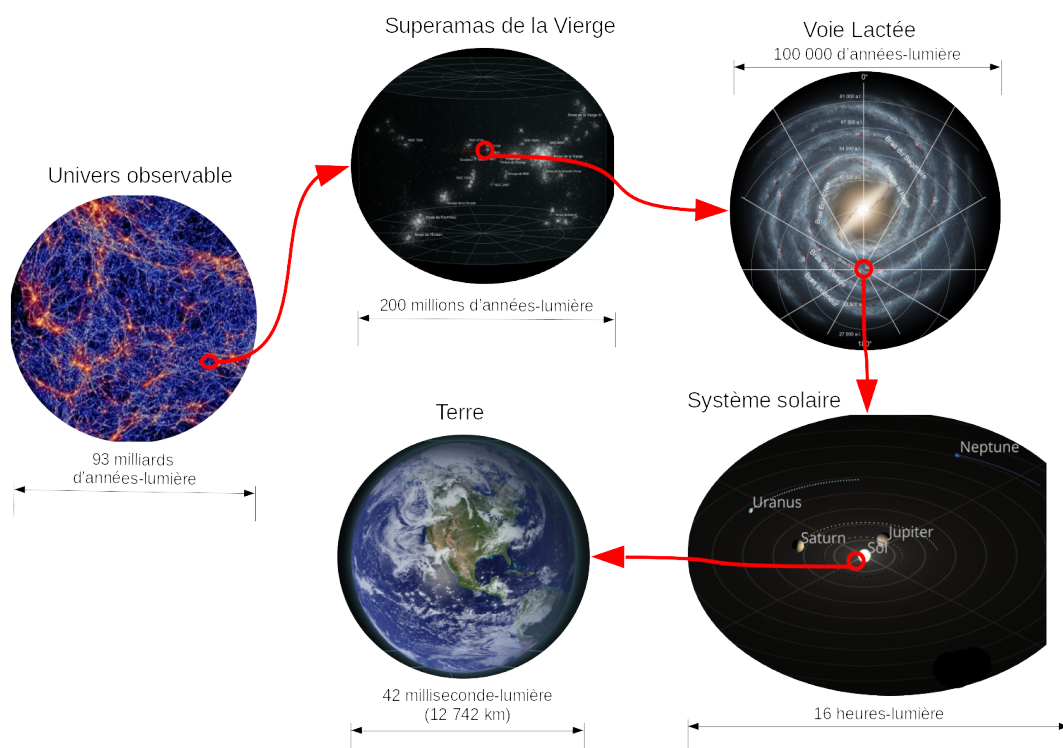


FIGURE 2 – Dimension de l'Univers

7. Le moment d'origine du Big-Bang.

8. L'Univers observable est l'Univers qu'il serait possible d'observer et mesurer.

2 Chronologie de l'Univers

La chronologie de l'Univers a été établie en mettant en relation les interprétations de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique.

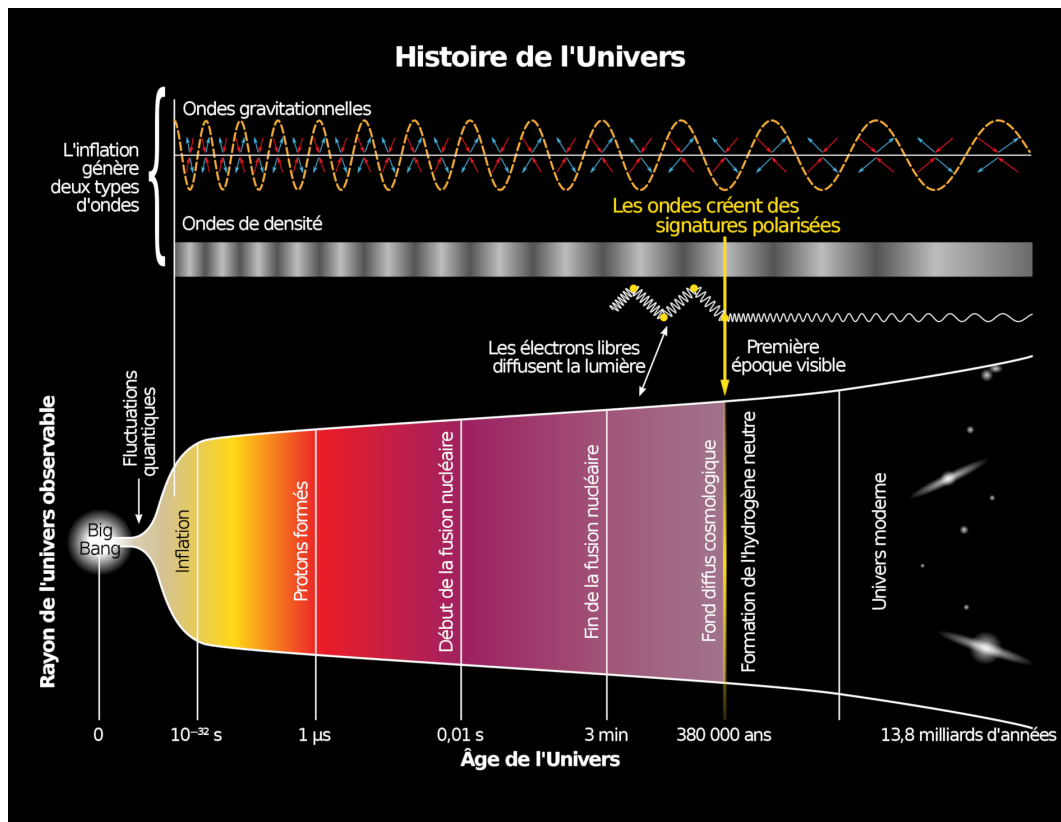


FIGURE 3 – Histoire de l'Univers

2.1 Les faits

2.1.1 Les galaxies s'éloignent

Depuis l'établissement de la loi Hubble-Lemaître en 1929, on sait que plus une galaxie est loin de nous, plus elle semble s'éloigner rapidement. Cet éloignement n'est pas dû à un mouvement des galaxies, mais à une expansion de l'espace lui-même. L'explication a été apportée par Georges Lemaître⁹ en 1927 sur base des travaux d'Einstein, tandis que l'observation a été faite par Edwin Hubble¹⁰.

2.1.2 Le fond diffus cosmologique

En astronomie, plus on regarde loin, plus on regarde dans le passé.

Sur base des travaux de Lemaître, des chercheurs américains prédisent en 1948, l'existence d'un rayonnement électromagnétique émis vers 380 000 ans après le Big Bang.

Ce fond diffus cosmologique sera observé en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson lors de la mise au point d'un radio-mètre pour une société de télécommunication.

Depuis on étudie les minimales variations de ce fond diffus cosmologique afin de mieux comprendre la structure de l'Univers.

9. Chanoine belge originaire de Charleroi

10. Astronome américain originaire du Missouri

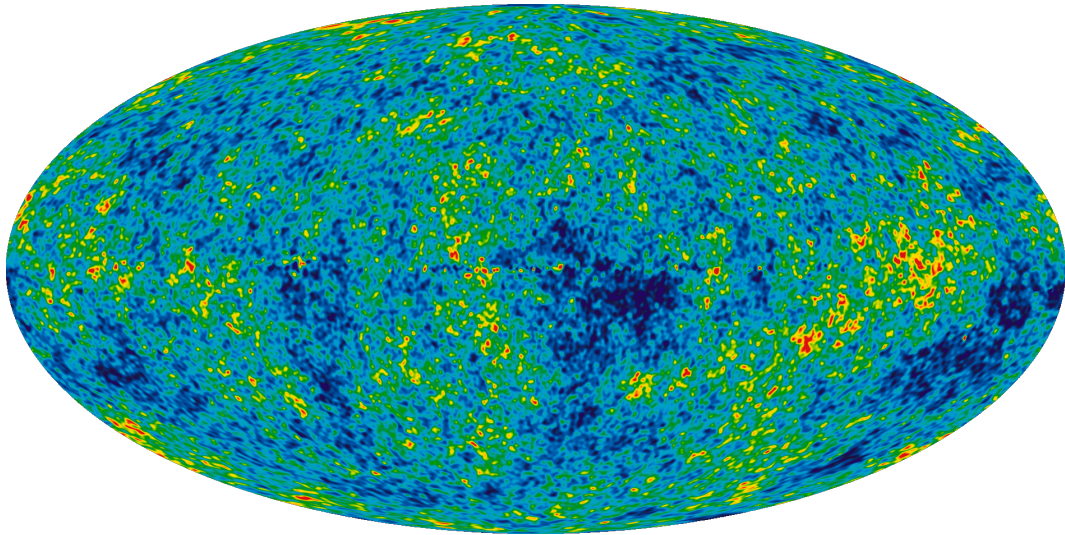


FIGURE 4 – Représentation sous forme de planisphère du fond diffus cosmologique

2.1.3 Les ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles sont d'infimes variations de l'espace-temps. Les ondes gravitationnelles ont été prédites par la relativité d'Einstein. Cependant, ce n'est que 2015, qu'elles ont pu être détectées par deux dispositifs différents¹¹. La détection venait de la rencontre de deux trous noirs situés à 1,3 milliards d'année-lumière.

En théorie, les ondes gravitationnelles permettraient de disposer d'observations antérieures à 380.000 années après le Big Bang.

11. Il s'agit des dispositifs LIGO aux États-Unis et VIRGO basé en Italie, mais géré par 5 laboratoires européens.

2.2 Une histoire de l'Univers et de la Voie Lactée

Les différents moments déterminés sont les suivants :

- **13,77 milliards d'années** : mur de Planck, point initial, les particules se forment, séparation de la matière et de l'anti-matière, diffusion de la lumière, phase d'expansion importante ;
- **13,769 62 milliards d'années** (soit 380 000 ans plus tard) : émission du fond diffus cosmologique, agrégation de l'hydrogène et de traces d'hélium et de lithium, formation des premières étoiles ;
- **10 milliards d'années** : formation de la Voie Lactée initiale par collision avec la galaxie Gaïa-Encelade ;
- **4,5 milliards d'années** : formation du **système solaire** ;
- 4,5 milliards d'années : formation de **la Terre et la Lune** par collision de la proto-Terre avec la planète Théïa d'une taille comparable à Mars.

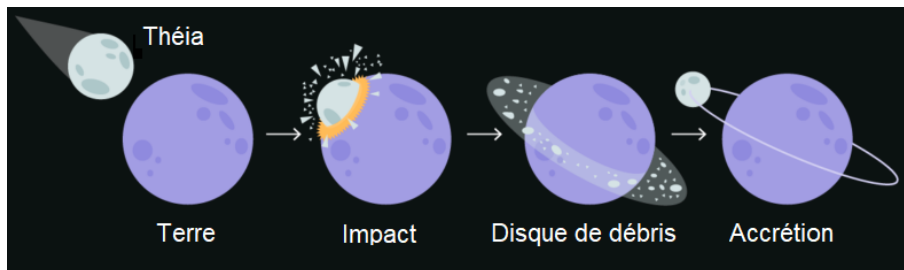


FIGURE 5 – Formation de la Lune

3 Évolution et mort des étoiles

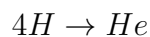
3.1 Gravitation

La majorité de la matière de l'Univers est de l'**hydrogène**. La force de gravitation a tendance à agréger cet hydrogène. Cette gravitation produit donc une **force centripète** orientée vers le centre de l'objet.

3.2 Fusion nucléaire

La fusion nucléaire est la réaction thermonucléaire. Elle consiste à fusionner deux noyaux d'atomes pour former un noyau plus lourd.

Soumis à des hautes énergies, les atomes tendront à fusionner. L'hydrogène donnera de l'hélium, qui lui-même donnera du lithium, du béryllium, du bore, .. (suivant le tableau de Mendeleïev). Lorsque le fer sera formé, la production d'énergie due à la fusion sera inférieure à l'énergie nécessaire à sa formation. C'est la raison pour laquelle, il existe peu d'atomes au-delà du numéro atomique du fer.



La production constante de la réaction thermonucléaire produit une **force centrifuge**.

3.3 Le mécanisme

L'équilibre des forces centripètes et centrifuges donne la forme sphérique de l'étoile.

Plus la masse initiale est importante, plus la réaction thermonucléaire sera violente, plus la durée de vie de l'étoile sera brève, plus des atomes lourds seront générés.

3.4 Les différents types d'étoiles et leur évolution

3.5 Les systèmes stellaires

3.5.1 Les naines brunes

Les **naines brunes** sont des objets dont la masse est inférieure à 0,075 fois la masse du Soleil, soit $\simeq 13$ fois celle de Jupiter. Leur masse leur permet d'émettre des infra-rouges par compression due à la gravité¹², mais ne leur permet pas de produire une réaction thermonucléaire.

3.5.2 Les naines rouges

Les **naines rouges** ont entre 0,075 et 0,4 fois la masse solaire. Les naines rouges sont les étoiles les plus fréquentes dans l'Univers (même si elles sont beaucoup moins visibles). Des réactions thermonucléaires s'y déroulent, mais les températures atteintes sont relativement faibles. De ce fait, elles peuvent fonctionner des centaines de milliards d'années avant de devenir des **naines blanches**. Lorsque les atomes seront trop lourds, les réactions thermonucléaires arrêteront, la naine blanche ne sera plus qu'un caillou inerte dans l'espace. Cependant, comme la durée de vie des naines rouges est de plusieurs centaines de milliards d'années, aucune n'est dans cet état.

12. comme la Terre en son centre qui est en fusion

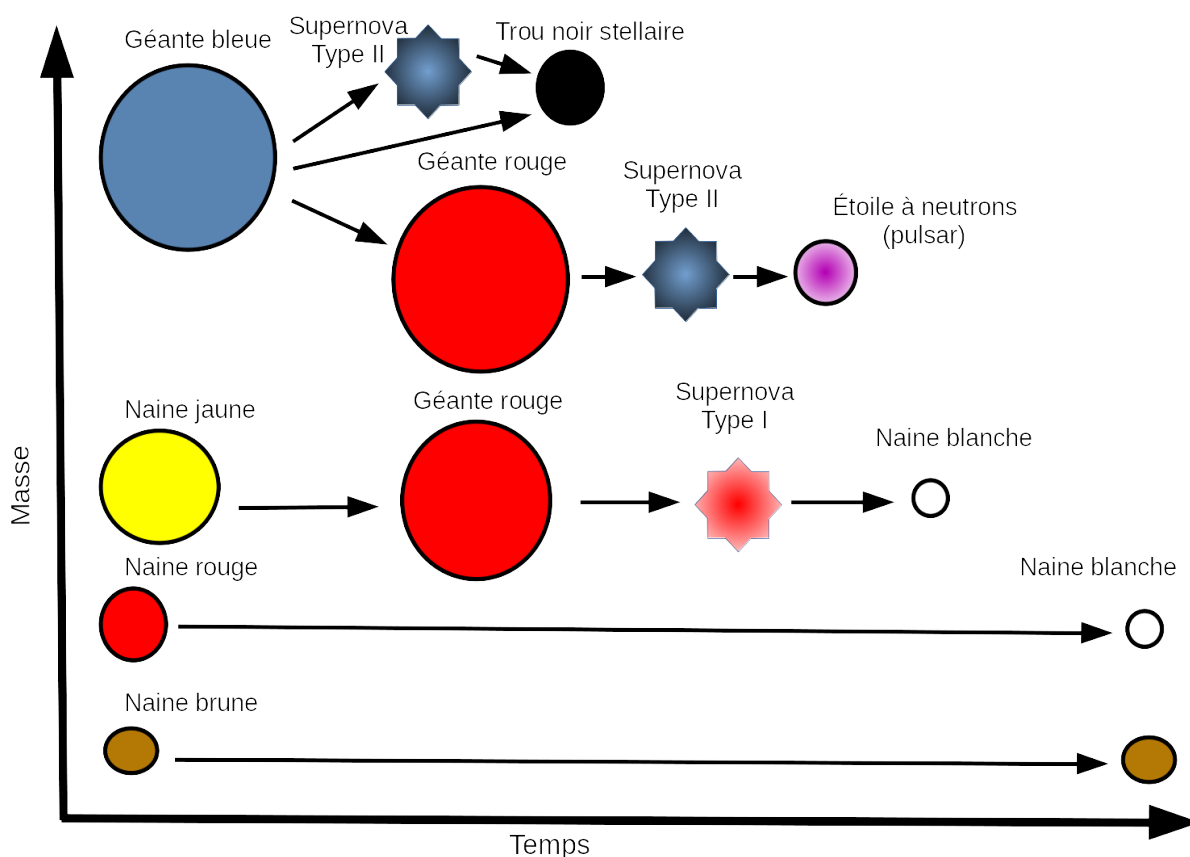


FIGURE 6 – Évolution des étoiles

3.5.3 Les naines jaunes

Les **naines jaunes** sont des étoiles comparables à notre Soleil. Leur masse se trouve entre 0,7 et 1,2 fois celle de notre soleil. La durée de vie des naines jaunes est de dix milliards d'années. En fin de vie, la naine jaune se transforme en **géante rouge**, puis explose en **nébuleuse planétaire** qui permettra de reformer une nouvelle étoile¹³. Notre Soleil s'est formé, il y a 4,5 milliards d'année ; il est donc à la moitié de sa vie.

3.5.4 Les géantes bleues, pulsars, trous noirs

Les **géantes bleues** sont des étoiles dont la masse est jusqu'à 10 fois la masse du Soleil. Leur durée de vie est de 100 millions d'années. Elles se transformeront donc rapidement en **géante rouge** avant d'exploser en **supernova**. La matière résiduelle extrêmement lourde forme un **pulsar**, ou étoile à neutrons. Une étoile à neutrons est un objet extrêmement dense en rotation sur elle-même (rotation entre 1 seconde et une milliseconde). Elle émet donc une onde électromagnétique périodique.

Les **supergéantes bleues** ont une masse entre 10 et 70 fois la masse du Soleil. Leur durée de vie est de 10 à 50 millions d'années. Après une explosion sous forme de **supernova**, elles termineront leur « vie » sous forme de **trou noir stellaire**¹⁴. Le trou noir est un objet dont la masse volumique est extrêmement élevée¹⁵. Même les photons ne peuvent sortir de son champ gravitationnel, il n'émet donc aucun rayonnement électromagnétique. Le rayonnement qui est mesuré des trous noirs ne vient pas du trou noir lui-même mais de son horizon, la surface à partir de laquelle les photons ne peuvent plus « sortir ».

13. Notre Soleil est une étoile de « 3ème génération » depuis la naissance de l'Univers

14. Un trou noir stellaire a une masse comprise entre 5 et 100 fois la masse solaire

15. Si la Terre était absorbée par un trou noir, son volume se réduirait à celui d'une pomme.

4 Évolution de la Terre

4.1 Orbite, rotation et Lune

Actuellement, l'orbite de la Terre est à **150 millions de kilomètres** du Soleil et sa période orbitale est de **365,25 jours**. La Terre tourne sur elle-même en **24 heures** avec un angle par rapport à son plan orbital¹⁶ de **23,4 °**.

Les frottements de l'air et de l'eau ont tendance à freiner la rotation de la Terre sur elle-même. Les jours s'allongent de plus ou moins une heure tous les 200 millions d'années.

L'orbite de la Lune est de **384 400 km**. La période orbitale de la Lune est de **27,3 jours**¹⁷. La Lune s'éloigne de la Terre de 3,8 cm par an.

4.2 Composition atmosphérique

La composition de l'atmosphère terrestre a fortement fluctué depuis sa formation. A sa naissance, l'atmosphère était beaucoup plus dense chargée en eau gazeuse(H_2O), dioxyde de carbone(CO_2), ammoniac(NH_3) et méthane(CH_4).

Cinq cents millions d'années après sa formation, la température de surface de la Terre est descendue en-dessous des **100 °C** ; ce qui a permis la formation de l'eau liquide (océans) et le processus du **cycle de l'eau** se met en fonctionnement. Sur la même période, le dioxyde de carbone a précipité probablement sous forme de carbonates. Les fluctuations du taux de CO_2 résiduel produisent un effet de serre plus ou moins important ; la Terre vit plusieurs époques où elle n'est plus qu'une « boule de glace »¹⁸.

Les premiers organismes photosynthétiques (des cyanobactéries) apparaissent 1 milliard d'années après la formation de la Terre. Ceux-ci enrichissent peu à peu l'atmosphère en oxygène. Mais il faut encore attendre 1 milliard d'années¹⁹ avant que le taux d'oxygène ne devienne décelable. L'**oxygène** (O_2) en haute altitude se transforme en ozone (O_3) ce qui permet de filtrer les rayons ultra-violet (UV) émis par le Soleil²⁰ et donc le développement d'une vie continentale.

Il y a 600 millions d'années le taux d'oxygène augmente considérablement. Cependant, des fluctuations de CO_2 continue à persister générant des refroidissements ou des réchauffements.

Il y a 5 millions d'années, la composition atmosphérique correspond à son état actuel.

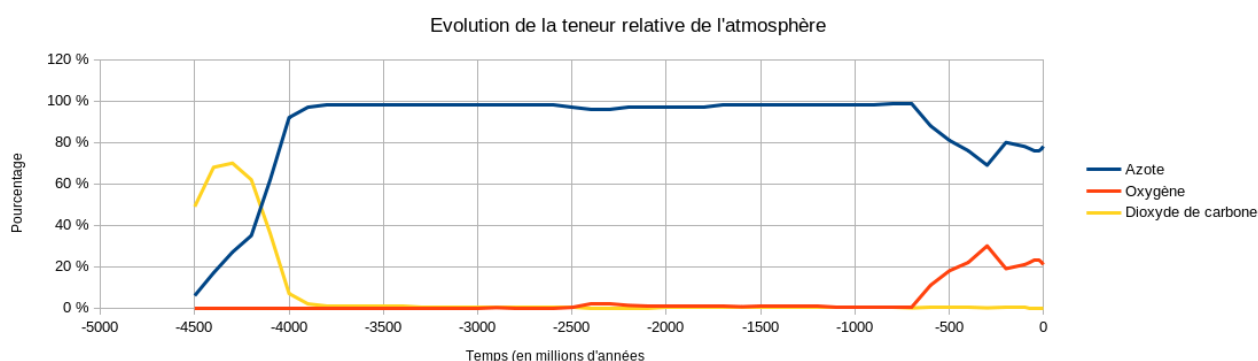


FIGURE 7 – Évolution des teneurs relatives de quelques gaz de la Terre .

16. Ce qui provoque les saisons en zone tempérée.

17. Mais, la période synodique de la Lune, c-à-d la période de rotation apparente vue de la Terre est de 29,5 jours.

18. Le dernier épisode de ce type s'est déroulé il y a 640 millions d'années.

19. Soit il y a 2,5 milliards d'années

20. en réémettant une lumière bleue ce qui produira la couleur du ciel.

4.3 Température moyenne

Durant les premiers âges de la Terre, la température de surface était très élevée suite l'accrétion de la matière et/ou la collision avec Théia. Il a fallu attendre les 500 premiers millions d'années pour que la température descende en-dessous des 100 °C grâce au rayonnement vers le cosmos du surplus énergétique.

Par la suite la température va rester relativement élevée et fluctuante. Il faudra attendre 3 milliards d'années pour qu'elle se stabilise au niveau actuel.

Cependant, des cycles vont se maintenir alternant des glaciations avec des périodes de réchauffement.

Si l'homme ne serait pas intervenu, nous serions actuellement dans un cycle de refroidissement.

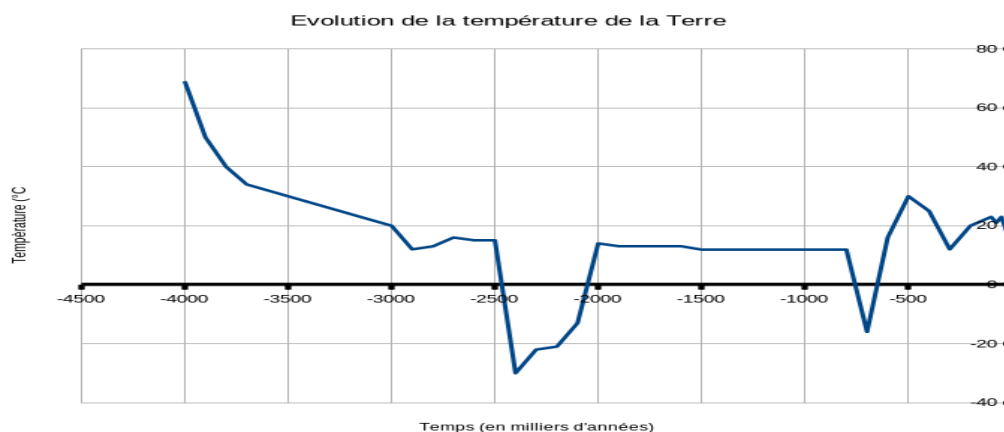


FIGURE 8 – Évolution de la température moyenne de la Terre (à partir de -3 milliards d'années).

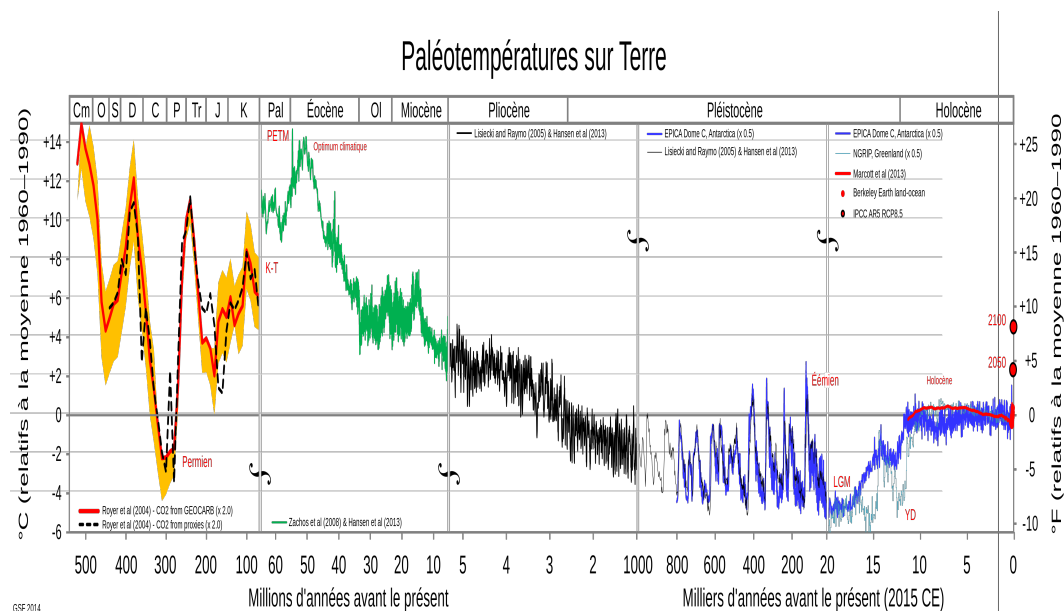


FIGURE 9 – Évolution de la température moyenne de la Terre (à partir de -500 millions d'années).

4.4 Bilan radiatif de la Terre / Effet de serre

La majorité de l'énergie terrestre vient des **radiations solaires** à courte longueur d'onde (rayonnement visible et ultra-violet)²¹.

L'émission du rayonnement solaire est très stable et correspond à $1361 \frac{\text{watts}}{\text{mètre}^2}$ à la distance orbitale de la Terre. Tenant compte que la moitié du globe terrestre est éclairé et qu'il s'agit d'une sphère, la moyenne de flux solaire à la surface terrestre est de $341 \frac{\text{watts}}{\text{mètre}^2}$.

Un tiers ($102 \frac{\text{watts}}{\text{mètre}^2}$) de cette énergie est directement réfléchi vers l'espace. Le reste est absorbé par l'atmosphère terrestre ou la surface terrestre.

Cette énergie absorbée est réémise sous forme de **rayonnement infra-rouge** à courte longueur d'onde. Les gaz à effet de serre²² sont des gaz qui « laissent passer » le rayonnement visible. Par contre, ces gaz absorbent fortement les rayonnements infra-rouges et les renvoient vers la surface terrestre.

Le résultat est de maintenir une certaine quantité d'énergie « piégée » entre la surface et l'atmosphère terrestre. Grâce à cet effet de serre, la température moyenne mondiale est de $14,9^\circ\text{C}$ ²³, alors que, sans cet effet de serre, elle serait de -18°C (en gel permanent).

Depuis la révolution industrielle, l'**apport anthropique de dioxyde de carbone** dues à la combustion d'énergies fossiles (gaz naturel, pétrole et charbon) a sensiblement augmenté la concentration de CO_2 dans l'atmosphère²⁴, ce qui a induit un déséquilibre radiatif de $0,9 \text{ W/m}^2$, soit une augmentation de $1,2^\circ\text{C}$.

Cette augmentation de température a plusieurs conséquences :

- une augmentation du niveau des mers de $\pm 3 \text{ mm/an}$ (par fonte des glaciers d'eau douce et expansion thermique) ;
- une modification de la circulation océanique ;
- une accentuation des régimes de précipitations (inondations, sécheresse) ;
- une migration ou disparition de certaines espèces.

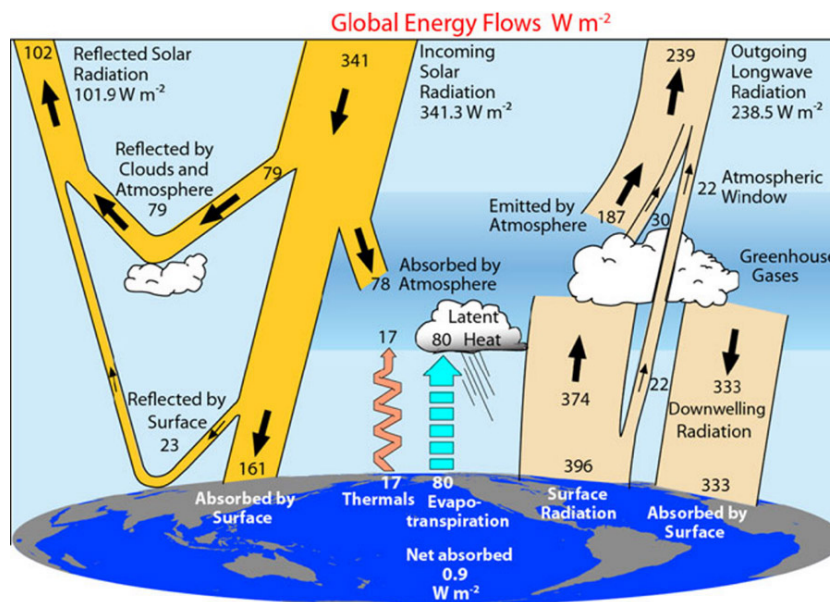


FIGURE 10 – Bilan radiatif de la Terre et effet de serre

21. Une faible partie (0,025 %) vient de la chaleur émise par le noyau terrestre (géothermie ou par la gravité (marée)).

22. Les principaux gaz à effet de serre sont l'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4).

23. Elle était de $13,7^\circ\text{C}$ vers 1900.

24. Elle était de 284 ppmv en 1839 contre 415 ppmv en 2021.

4.5 Tectonique des plaques

Au fur et à mesure du refroidissement de la Terre, différentes couches se sont structurées. On peut distinguer :

1. La **croûte terrestre** (ou lithosphère) comprenant :
 - la croûte océanique (1a) est relativement fine (± 5 km d'épaisseur) et est faite de roches essentiellement basaltiques ;
 - la croûte continentale (1b) est plus épaisse est de 30 à 100 km d'épaisseur et est faite essentiellement de roches granitiques.
2. Le **manteau** est le volume principal de la Terre avec 84 % du volume total, il fait fait ± 2.900 km de rayon :
 - Le manteau supérieur ou asthénosphère (2a) est assez « plastique, visqueux », on dit qu'il est « ductile » du fait d'une pression relativement faible, mais de températures assez élevées.
 - Le manteau inférieur est de moins en moins visqueux (donc plus solide) au fur et à mesure que la profondeur, et donc la pression augmente.
3. Le **noyau** fait approximativement 3.500 km de rayon. Sa température est de ± 4.000 °C.
 - Le noyau externe (3a) est liquide.
 - Le noyau interne (3b) est solide et est composé majoritairement de fer et de nickel.

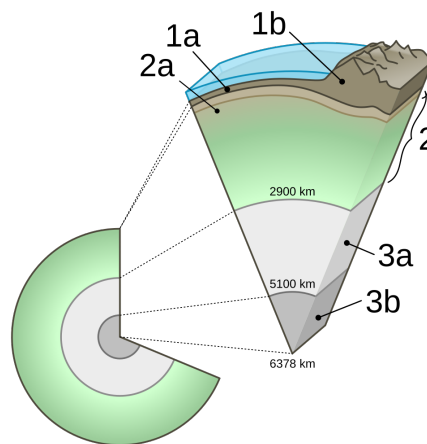


FIGURE 11 – Structure interne de la Terre

La croûte repose donc sur une couche qui est visqueuse à une grande échelle de temps. De plus, des poussées liées à la chaleur interne de la Terre remontent du manteau par convection. Ceci entraîne que des fractures sur les points les plus fragiles, soit souvent la croûte océanique²⁵. Ces zones de fracture océaniques sont appelées « **dorsales océaniques** ». Ceci entraîne de repousser les plaques océaniques sous les plaques continentales. C'est le **phénomène de subduction** qui entraîne à la fois du volcanisme et des tremblements de terre (séismes). Certains volcans qui ont un magma différent sont situés au milieu des plaques par remontée directe du manteau profond. Il s'agit du volcanisme par « **point chaud** »²⁶.

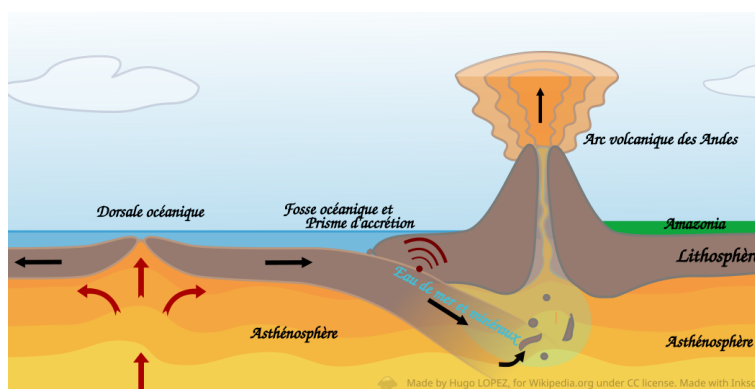


FIGURE 12 – Dynamique de la croûte terrestre (en exemple la plaque Nazca en face de la côte occidentale d'Amérique du Sud).

25. Une zone de fracture en cours se fait pourtant sur la plaque africaine, le grand rift africain.

26. C'est le cas des volcans de Hawaï et de l'île de la Réunion, par exemple.

Dès que la croûte terrestre devient solide, vers **4,3 milliards d'années**, la structure interne de la Terre se met en place (apparition du champ magnétique, migration des composés lourds vers le centre de la Terre).

La masse d'eau qui précipite vers **4 milliards d'années** forme une surface uniforme d'océans sur l'ensemble de la planète. Peu à peu, les mouvements tectoniques font émergés des îles, puis des continents. Le poids des océans modifie la croûte terrestre en couche océanique plus mince et en couche continentale plus épaisse.

Par la suite la forme des continents fluctuent au gré du niveau des océans et des mouvements tectoniques.

Le schéma ci-dessous montre le mouvement de ces plaques de 200 millions d'années à maintenant.

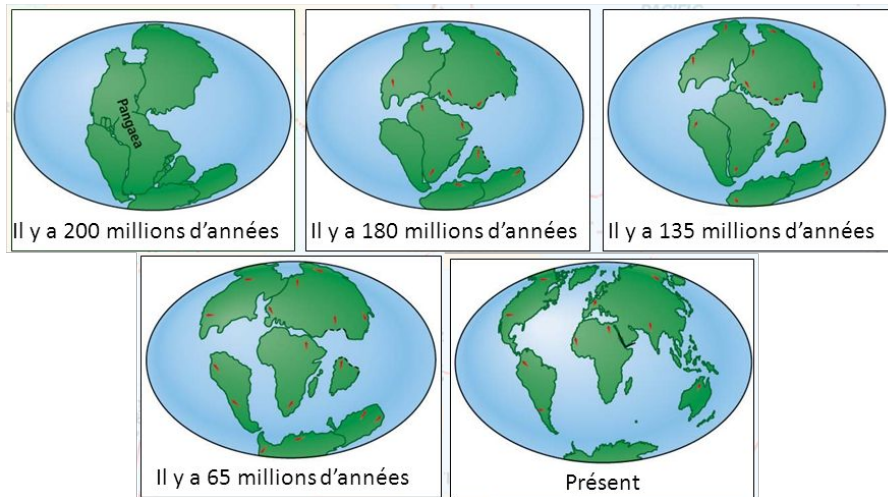


FIGURE 13 – Évolution des plaques tectoniques depuis 200 millions d'années

Le schéma ci-dessous montre les différentes plaques de croûtes terrestres connues tant océaniques que continentales.

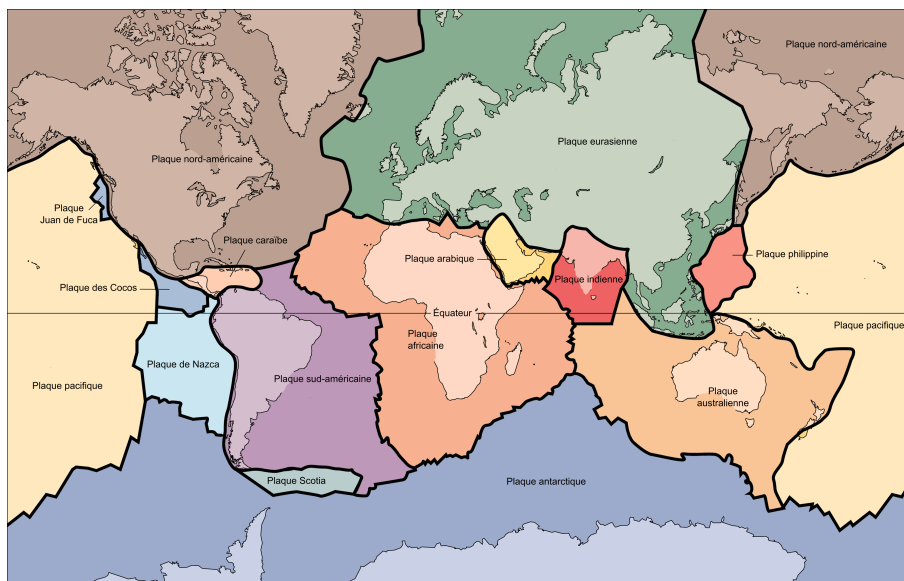


FIGURE 14 – Plaques tectoniques actuelles

Table des matières

1 Structures et dimensions	1
1.1 Les planètes	1
1.2 Les systèmes stellaires	2
1.3 Les galaxies	2
1.4 Les amas de galaxies	3
1.5 L'Univers	3
2 Chronologie de l'Univers	4
2.1 Les faits	4
2.1.1 Les galaxies s'éloignent	4
2.1.2 Le fond diffus cosmologique	4
2.1.3 Les ondes gravitationnelles	5
2.2 Une histoire de l'Univers et de la Voie Lactée	6
3 Évolution et mort des étoiles	7
3.1 Gravitation	7
3.2 Fusion nucléaire	7
3.3 Le mécanisme	7
3.4 Les différents types d'étoiles et leur évolution	7
3.5 Les systèmes stellaires	7
3.5.1 Les naines brunes	7
3.5.2 Les naines rouges	7
3.5.3 Les naines jaunes	8
3.5.4 Les géantes bleues, pulsars, trous noirs	8
4 Évolution de la Terre	9
4.1 Orbite, rotation et Lune	9
4.2 Composition atmosphérique	9
4.3 Température moyenne	10
4.4 Bilan radiatif de la Terre / Effet de serre	11
4.5 Tectonique des plaques	12