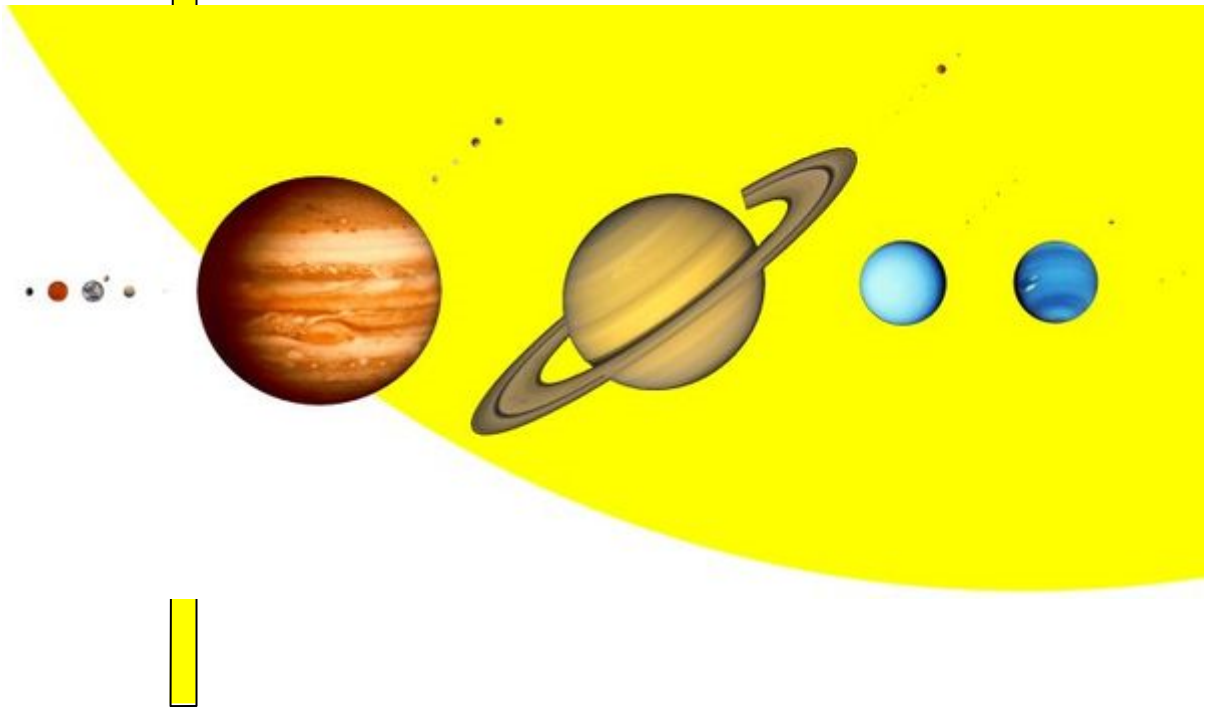


FILIERE SVI/S1

Module de géologie générale

POLYCOPIE

Partie II : COSMOLOGIE : LA TERRE DANS L'UNIVERS



Module de Géologie Générale

SVI-STU, S1

Partie 2 : COSMOLOGIE : LA TERRE DANS L'UNIVERS

A- UNIVERS

I- Introduction

1. - Quelques définitions

L'Univers est l'ensemble de tout ce qui existe. On l'appelle également le Cosmos ou l'Espace lorsqu'on parle du milieu extraterrestre.

- * La Cosmologie est l'étude de la structure, de l'origine et de l'évolution de l'Univers.
- * L'Astronomie est la science des corps célestes. (céleste est un mot qui est relatif au ciel).
- * L'Astrophysique est l'étude des propriétés physiques des corps célestes.

En **Cosmologie**, science qui étudie l'Univers (sa structure, sa formation et son évolution), la question de ses origines est l'une des plus fondamentales que l'homme puisse se poser. Nous essaierons dans cette partie de donner une idée sur l'Univers et son évolution, ainsi que ses composants (galaxies, étoiles, milieu interstellaire, etc.).

L'étude de l'Univers suppose que celui-ci puisse être assimilé à un objet physique qui obéit à des lois au même titre qu'une particule élémentaire. Cette hypothèse fondatrice de la Cosmologie est pourtant hardie car on applique à l'Univers qui est le Tout (= à la fois l'espace, le temps et la matière : la trame même des lois physiques) des lois de même nature que ses constituants.

Face à la complexité d'un Univers démesurément grand et définitivement inaccessible, les physiciens ont posé un axiome simplificateur connu sous le nom de principe cosmologique qui dit : à grande échelle l'Univers est homogène et isotrope.

A l'échelle de l'Univers, la physique est soumise au pouvoir absolu de la gravitation. Cette dynamique permet de décrire l'évolution du « contenu » de l'Univers mais ne nous renseigne pas sur l'Univers lui-même. Ceci puisque la mécanique classique renvoie l'image d'un espace et d'un temps statiques. Il fallut attendre la théorie de la relativité générale pour que l'Univers accède au statut d'objet physique.

Armée du principe cosmologique et de la relativité générale, la cosmologie a pu enfin se lancer à la découverte de l'histoire de l'Univers.

Avec les progrès technologiques actuels et futurs, beaucoup de notions cosmologiques acquises vont être précisées, d'autres vont être découvertes. Le satellite Planck par exemple, lancé en 2009, devrait améliorer notre connaissance du sujet et aussi permettre de mieux déterminer les paramètres entrant en jeu dans les modèles cosmologiques.

En utilisant des instruments du VLT (Very Large Telescope), une équipe d'astronomes britanniques (dont l'astrophysicien Paul Crowther, de l'université de Sheffield) a découvert en 2010, **l'étoile la plus massive connue à ce jour**. Baptisée R136a1, elle a une masse équivalente à environ 265 fois celle du soleil et est également près de **dix millions de fois plus** lumineuse. Avec une masse à la naissance estimée à **320 fois la masse de notre soleil** (diamètre estimé à **417 600 000 km** contre **1 392 000 km**), soit un plus de deux fois les 150 masses solaires considérées actuellement comme la masse maximale pour une étoile. Les astronomes s'interrogent sur les processus qui ont pu engendrer un tel monstre, car ils pensaient

que les limites théoriques sont de 150 masses solaires.

La géante a été découverte au centre d'un amas d'étoiles de la nébuleuse de la Tarentule, elle-même située dans le Grand nuage de Magellan, galaxie se trouvant à 165 000 années-lumière de notre Voie lactée.



Un zoom sur la nébuleuse de la Tarentule dans le visible aboutissant à l'amas RMC 136a vue dans l'infra-rouge proche, ici en fausses couleurs. Crédit : ESO/P. Crowther/C.J. Evans. (FUTURA SCIENCES)

2. - L'échelle des distances pour mesurer l'Univers

En 1920 Hubble arrive à mesurer la luminosité apparente des Céphéides (des étoiles avec une variation périodique de la luminosité) en déduit la luminosité absolue et arrive à calculer ainsi leur éloignement

En astronomie plus on voit loin dans l'espace plus on voit loin dans le temps .

En on utilise généralement deux sortes d'échelles pour mesurer les distances:

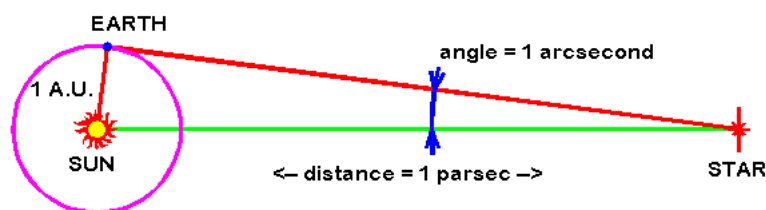
a) - **L'année lumière** : c'est la distance parcourue en un an par la lumière. Elle est notée *al* et elle vaut $9,46 \cdot 10^{15}$ m. (on rappelle que la vitesse de la lumière est d'environ 300.000 km/s).

b) - **L'unité astronomique**, notée *UA*, est la distance entre la Terre et le Soleil : 1 UA = 150.000.000 km environ.

c) - **Le parsec**, noté *pc*, correspond à la distance d'un astre (depuis le Soleil) dont la *parallaxe annuelle* correspond à 1 seconde (explication en fig.).

$1 \text{ parsec} = 206.265 \text{ UA} = 3,23 \text{ al} = 3100 \text{ milliards de km}$

$1 \text{ Mpc} = 1 \text{ mégaparsec} = 1 \text{ million pc}$.



Voici quelques distances repères :

Terre-lune = une seconde-lumière	= 300 000 km
Terre-soleil = 8 mn-lumière	= 144 000 000 km
Diamètre du soleil = 20 s-lumière	= 6 000 000 km

Les objets les plus éloignés observés actuellement sont à 12 milliards d'années-lumière

II- Architecture de l'univers

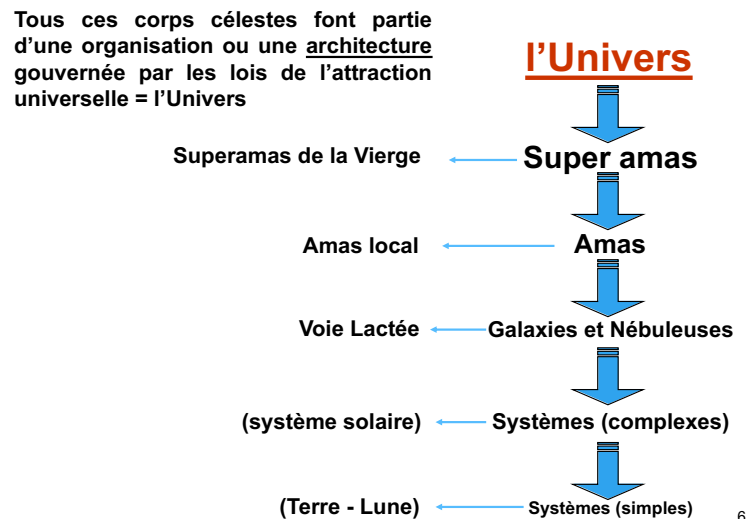
Face à la complexité d'un Univers démesurément grand et définitivement inaccessible, les physiciens ont posé un axiome simplificateur connu sous le nom de principe cosmologique qui dit : à grande échelle l'Univers est

homogène et isotrope.

Les corps cosmiques que sont les étoiles représentent la plus forte concentration de la matière de par leur abondance.

La masse de la matière de ces corps est très importante mais la densité de l'univers est très faible et ne représente que $3.10^{-31} \text{ g/cm}^3$.

Le mouvement et la position de toutes ces particules dans l'espace sont gérés par la gravitation. Les étoiles et toutes les autres formes de la matière se regroupent en systèmes :



le cas le plus simple étant la terre et son satellite la lune

puis d'un ordre plus grand le système solaire

puis plus grand la galaxies : voie lactée

amas local et le super amas de la vierge

Le centre du super amas est en général occupé par une galaxie très massive (centaines de fois la masse d'une galaxie normale) autour de laquelle les autres galaxies gravitent.

Une constellation est un ensemble d'étoiles visibles à l'œil nu dont les projections sur la voûte céleste sont suffisamment proches pour qu'on les relie par des lignes imaginaires, traçant ainsi une figure (animale, personnage mythologique ...) sur la voûte céleste. Les étoiles d'une constellation peuvent appartenir à plusieurs systèmes célestes.

III- Modèle de formation de l'univers : « Big Bang »

Les observations d'Edwin Hubble du décalage vers le rouge des rayonnements électromagnétiques en provenance d'autres galaxies suggèrent que celles-ci s'éloignent de notre galaxie. La vitesse d'éloignement d'une galaxie est proportionnelle à son éloignement, ce qui est connu sous le nom de loi de Hubble ; une telle loi correspond à un univers proche en expansion.

Bien que la constante de Hubble ait été révisée par le passé dans d'importantes proportions (dans un rapport de 10 à 1), la loi de Hubble a été extrapolée aux galaxies éloignées, pour lesquelles la distance ne peut être calculée au moyen de la parallaxe ; cette loi est ainsi utilisée pour déterminer la distance des galaxies les plus lointaines.

En extrapolant l'expansion de l'Univers dans le passé, on arrive à une époque où celui-ci a dû être beaucoup plus chaud et beaucoup plus dense qu'aujourd'hui. C'est le modèle du **Big Bang** qui est un ingrédient essentiel du modèle standard de la cosmologie actuelle et possède aujourd'hui un grand nombre de confirmations expérimentales.

Le Big Bang est le modèle cosmologique aujourd'hui adopté par la majorité des astrophysiciens. Ce modèle ne prétend pas être la vérité absolue, mais sa précision dans sa description des phénomènes

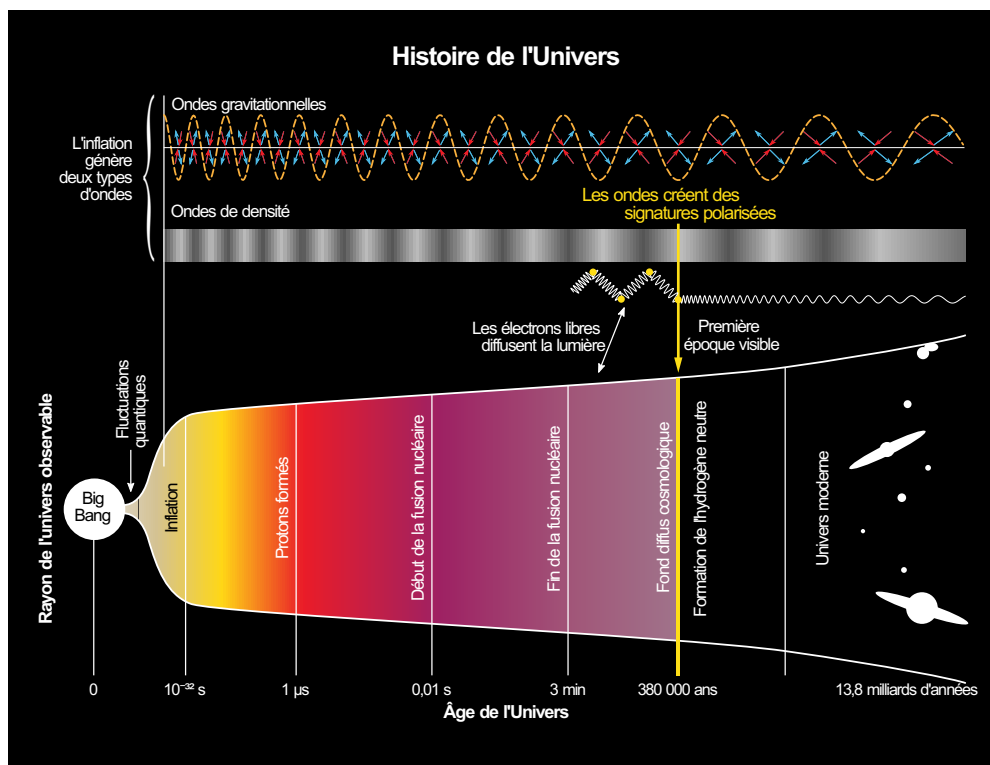
astronomiques et ses prédictions maintes fois validées font de lui un modèle de premier ordre.

Cette théorie de l'évolution de l'univers propose que celui-ci est le résultat d'une « explosion » originelle de l'espace-temps, suivie d'une expansion. Cette rapide expansion eut lieu partout à la fois sur la totalité de l'espace-temps.

Dans quel état se trouvait l'Univers avant le « Big Bang » ? La science ne peut répondre à cette question car les conditions physiques qui régnaient alors ne peuvent être décrites par le moyen des théories actuelles.

Les modèles actuels « physique quantique » nous permettent de remonter le temps jusqu'aux tous premiers instants du cosmos. Il y a cependant une limite dans cette remontée, car en deçà d'un certain temps « ère de Planck », la physique n'a plus rien à dire. En effet, la théorie de la relativité et la théorie de la physique quantique se contredisent en deçà de cet instant.

Le modèle privilégie l'existence d'une phase d'inflation cosmique très brève mais durant laquelle l'univers aurait grandi de façon extrêmement rapide, les particules vont alors se repousser mutuellement, ce qui a pour conséquence l'expansion de l'univers et donc un début de refroidissement. Dans les tout premiers instants après le Big Bang, l'Univers était extrêmement chaud et dense. Lorsque l'Univers commença à se refroidir, les conditions permirent aux constituants de base de la matière - les quarks et les électrons, dont nous sommes tous constitués - de faire leur apparition. Quelques milliardièmes de seconde plus tard, les quarks se sont assemblés pour produire des protons et des neutrons, lesquels se sont regroupés en quelques minutes pour constituer les noyaux des futurs atomes. Au fur et à mesure que l'Univers poursuivait son expansion et son refroidissement, le rythme s'est ralenti. Il a ainsi fallu 380 000 ans pour que les électrons soient capturés dans l'orbite des noyaux, donnant naissance aux premiers atomes. Il s'agissait essentiellement d'hélium et d'hydrogène, qui sont encore aujourd'hui, et de loin, les éléments les plus répandus dans l'Univers. Les observations actuelles suggèrent que les premières étoiles se sont formées à partir de nuages de gaz environ 150-200 millions d'années après le Big Bang (et la lumière fut !!). Désormais, des atomes plus lourds, tels que le carbone, l'oxygène et le fer, sont produits sans cesse au cœur des étoiles et sont projetés dans tout l'Univers lors d'explosions stellaires spectaculaires appelées supernovas.



IV- Taille de l'univers

La taille de l'univers = paradoxe !!!

Le Visible : implique que quel que soit les moyens, l'homme est capable d'apprécier cette partie de l'Univers.

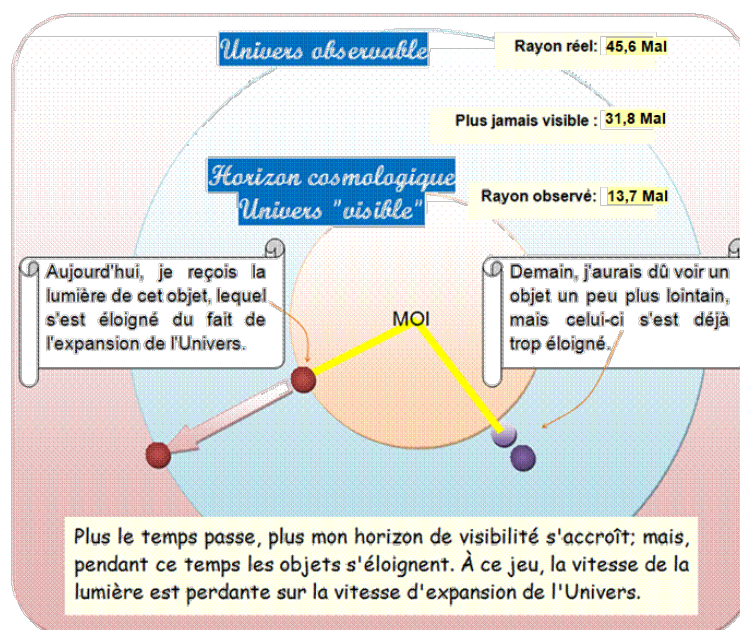
Or la lumière existe depuis la création de l'Univers (ou presque). Nos instruments ne peuvent capter que la partie de l'Univers qui se trouvait là à cet instant. Notre horizon visible est donc situé à 13,7 milliards d'années-lumière (âge de l'univers). Les objets situés dans l'Univers au-delà de cette distance nous sont invisibles.

Univers observable est un terme utilisé par les scientifiques pour désigner tout l'univers observable même au-delà du temps de parcours de la lumière. Il mesure 46,5 milliards d'années-lumière de rayon (93 G.a.l en diamètre). Seuls 13,7 G.a.l nous sont accessibles.

L'Univers étant en expansion et cela plus rapidement que la vitesse de la lumière, paradoxalement, une partie de l'Univers observable se soustrait à notre vue. À chaque jour qui passe, une partie de l'Univers, sous l'effet prépondérant de l'expansion, disparaît de notre horizon de visibilité.

La limite entre la partie visible et le reste de l'Univers observable est appelé **l'horizon cosmologique**.

Remarque: soit un point P de l'univers observé à X années de lumière. Les photons ont mis ce temps pour nous parvenir. Pendant ce temps ce point P de l'Univers s'est déplacé du fait de l'expansion de l'Univers. En fait, où est-il maintenant, au moment où je l'observe? Il a fait du chemin



V- Composition actuelle de l'Univers

1) Les Galaxies

Une galaxie est un ensemble d'étoiles, de poussières et de gaz interstellaires dont la cohésion est assurée par la gravitation. Les galaxies présentent une grande diversité de taille (entre 2.000 et 500.000 années-lumière de diamètre) et de forme.

La **Voie Lactée**, notre galaxie, contient plus d'une centaine de milliards d'étoiles (à l'échelle universelle, elle se situe dans la moyenne des galaxies spirales. Les galaxies ne sont pas distribuées de façon aléatoire dans l'Univers, elles ont tendance à se regrouper en groupes ou en amas eux-mêmes groupés en superamas. La galaxie d'Andromède (galaxie voisine) est située à 2,3 millions d'années-lumière. Notre galaxie possède toutefois deux petites galaxies satellites (le grand et le petit Nuages de Magellan) situées respectivement à environ 150.000 et 200.000 années-lumière. Elles font toutes partie du **Groupe Local** composé d'une majorité de galaxies elliptiques naines et irrégulières.

Edwin Hubble a montré que les galaxies semblaient s'éloigner de nous, à une vitesse d'autant plus grande qu'elles sont lointaines. Cette propriété fondamentale qui implique que l'Univers est en expansion, est à la base de la cosmologie moderne. Elle constitue l'un des trois arguments extrêmement forts en faveur du modèle cosmologique standard, dit du Big Bang; les deux autres étant l'observation du fond diffus

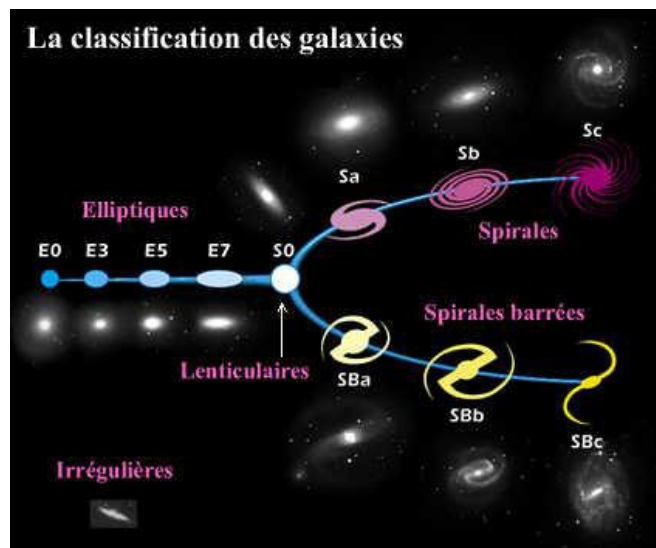
cosmologique et les **abondances des éléments légers** (hydrogène, hélium et lithium).

On connaît peu de choses sur la formation des galaxies, la **gravitation** a dû y jouer un grand rôle puisqu'elle prédomine encore dans la **hiérarchisation** de l'univers.

Aux limites de l'Univers observable, la *galaxie la plus lointaine* observée à ce jour, découverte en 2004, n'est pas très spectaculaire, mais sa lumière a mis **13,2 milliards d'années** à nous parvenir !

Dans une galaxie, **toutes les étoiles tournent autour d'un axe**. Il existe plusieurs types de galaxies que l'on classe selon leur morphologie.

Edwin Hubble (1889 - 1953), astronome américain, a proposé en 1926 la classification morphologique des galaxies suivante appelée : la séquence de Hubble.



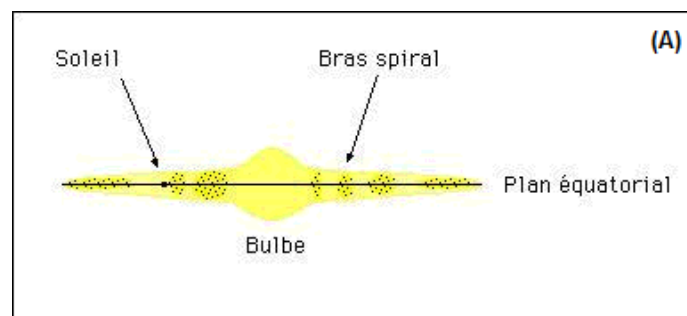
* **Les galaxies spirales** : notre galaxie, la Voie Lactée, en fait partie. C'est une *galaxie spirale* comme 25 % des galaxies de l'univers. Les bras des spirales sont issus de la compression de la matière à cause de la rotation de la galaxie. Ils apparaissent comme des lieux privilégiés de formation stellaire. Le bulbe, qui est le renflement central, contient des étoiles d'âges variés et enfin le halo galactique formé de gaz et de poussières dans lequel on trouve des étoiles vieilles et des amas globulaires. Les galaxies spirales barrées sont caractérisées par le fait que les bras spiraux s'étendent à partir des extrémités d'une « barre » qui traverse le bulbe galactique.

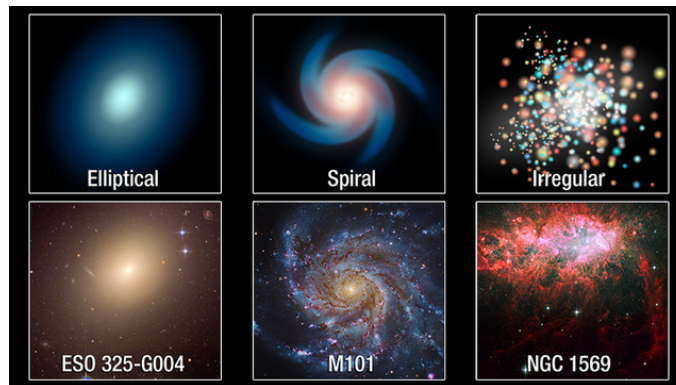
* **Les galaxies elliptiques** (65 % des galaxies) : n'ont pas de structures évidentes, à part leur symétrie elliptique ou sphérique. Elles sont composées en majorité d'étoiles âgées et sont le siège d'émissions radios importantes, d'où leur nom de *radiogalaxies*.

* **Les galaxies lenticulaires** (S0 ou SB0) sont des galaxies à disque sans bras spiraux bien définis. Elles représentent la transition entre une galaxie elliptique et une galaxie spirale dans la séquence de Hubble

* **Les galaxies irrégulières** : qui n'entrent pas dans ces 2 types principaux, ne représentent que 10 % des galaxies, elles sont riches en matières interstellaires et pauvres en éléments lourds. Plus les galaxies évoluent, plus la matière interstellaire est consommée par les étoiles qui rejettent à leur mort des éléments lourds.

galaxie spirale (A : schéma)





Dans l'espace il n'est pas rare que deux galaxies proches rentrent en collision. Lors de la rencontre de deux galaxies, les effets de marée peuvent arracher des langues de matière. Les régions où la collision a déclenché la formation d'étoiles sont visibles en bleu (étoiles jeunes et chaudes).



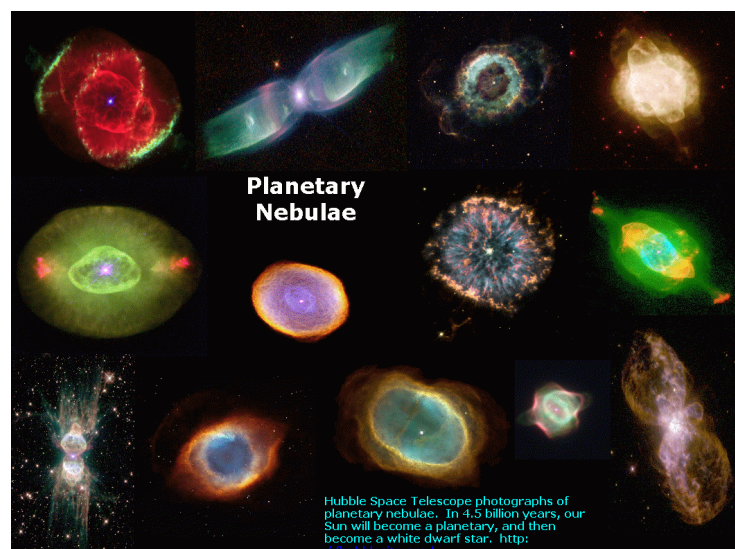
2) Les nébuleuses

Vaste nuage de matière interstellaire (composée de **poussières et de gaz**) où la densité est nettement supérieure à celle de l'espace interstellaire. Le **gaz** est un mélange de **molécules variées** : en plus de l'**hydrogène moléculaire** (H_2) qui est majoritaire, on y trouve des **alcools**, de l'**ammoniac**, des **aldéhydes** (proches des sucres) et de l'**eau**. Ces molécules sont issues de la rencontre et la combinaison des atomes produits par l'étoile.

Cet amas de gaz peut provenir d'une **explosion unique d'une nova ou d'une supernova**, comme pour la nébuleuse du Crabe.

La **température** des nuages interstellaires est suffisante pour que la **pression contrebalance la gravitation**, le nuage est **en équilibre**. Mais sous l'effet de poussières et de molécules complexes, la **température baisse** et le nuage tend alors à **s'effondrer sous son propre poids**. Ce phénomène peut être également déclenché ou aidé par une **explosion d'étoile voisine** ou une **collision avec un autre nuage** qui comprime la matière interstellaire et rompt l'équilibre entre pression et gravité.

Les étoiles se forment à l'intérieur de certaines nébuleuses comme celle, très connue, d'**Orion** ou de la **Rosette**.



3) Les étoiles

Une étoile, corps céleste le plus abondant dans l'univers, est un astre, formé de gaz accrétié, à l'intérieur duquel se produisent des réactions de fusion thermonucléaire. Ces réactions sont à l'origine du rayonnement électromagnétique. La détection des étoiles est facilitée grâce à leur rayonnement. Ainsi, plusieurs milliers d'étoiles sont visibles à l'œil nu. On estime à plusieurs centaines de milliards le nombre d'étoiles figurant dans notre galaxie (la Voie Lactée) uniquement.

Les étoiles prennent naissance dans une **nébuleuse** primordiale, à partir des nuages de matières interstellaires gigantesques (environ plusieurs centaines de millions de kilomètres et d'une masse allant de 1 à plusieurs millions de masses solaires) présents dans l'univers après le Big bang.

Après un **événement déclencheur**, la matière va à l'appel de sa propre gravité, se contracter et se réchauffer. Le nuage se décompose alors en **plusieurs nuages plus petits**, mais plus denses, qui se contractent à leur tour. Les **premiers embryons stellaires** apparaissent. Grâce aux mouvements des charges électriques accélérées, ils émettent des **rayonnements radios et infrarouges**.

La **contraction gravitationnelle** du cœur et l'**accrétion** de la matière des zones externes sont les **seules sources d'énergie** à ce stade. L'énergie rayonnée par la **proto-étoile** est donc d'origine purement gravitationnelle.

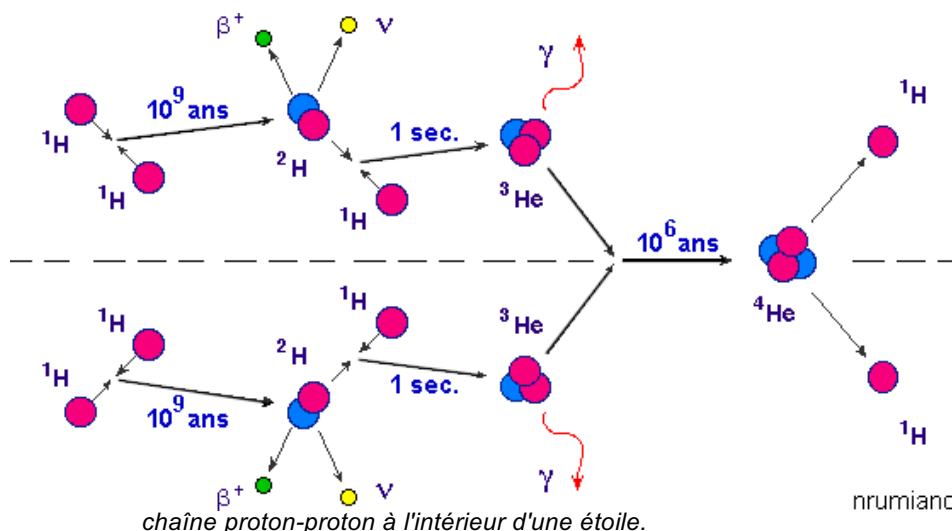
a) La nucléosynthèse

On appelle nucléosynthèse l'ensemble des réactions nucléaires qui se sont produites soit lors de la naissance de l'Univers observable (nucléosynthèse primordiale) riche en Hydrogène, ou qui se produisent par transformation et synthèse des différents éléments chimiques à partir de l'hydrogène primordial à l'intérieur des étoiles,

Les **collisions se multiplient**, des **photons** dont l'énergie est de plus en plus élevée apparaissent sans cesse. D'**infrarouge**, la lumière émise passe au **rouge**, l'étoile devient "**visible**", selon **sa masse** elle virera au **jaune** ou au **bleu selon sa taille**. La température centrale de l'étoile dépasse $10^{10} \text{ }^{\circ}\text{C}$. A cette température, la **répulsion électrique des protons est vaincue**, la **force nucléaire** entre en jeu : **2 noyaux d'hydrogène** (protons) se rencontrent, fusionnent et forment du **Deutérium** (hydrogène lourd). Ce Deutérium **fusionne** ensuite avec un proton pour former de l'Hélium 3 (^3He). Il faut ensuite 2 noyaux d'hélium 3 pour donner l'hélium 4 (^4He).

Cette nucléosynthèse, **véritable fusion nucléaire**, produit de l'énergie nucléaire sous la forme de **photons = lumière**

Des résultats présentés le vendredi 23 septembre 2011 au cours d'un séminaire au CERN (Laboratoire Européen pour la Physique des Particules) à Genève, ont détecté des particules, les neutrinos, filant plus vite que la lumière. L'écart relatif, bien que faible, est significatif : quelque 0,002 % de plus. Un des piliers de la physique, le caractère indépasseable de la vitesse de la lumière (près de 300 000 kilomètres par seconde), serait donc ébranlé. Si ce résultat se confirme, cette relation d'Einstein (et d'autres notions de la Physique) est à revoir !



Cette étape majeure, va se manifester par un changement de comportement de l'étoile: les réactions thermonucléaires vont fournir **l'énergie nécessaire pour contrecarrer l'action de la force de gravitation**. L'étoile n'a **plus besoin de se contracter** pour obtenir de l'énergie qui lui permet de briller et de supporter son propre poids. Les contractions s'arrêtent alors.

Vue de l'extérieur, **l'étoile ne se modifie plus**, elle va donc garder son diamètre et sa couleur inchangés pendant tout le temps que durera la fusion de l'hydrogène en hélium.

La nucléosynthèse primordiale n'a guère pu fabriquer que de l'hélium 4, et ce sont **les étoiles**, disposant de densités beaucoup plus élevées et de beaucoup plus de temps qui synthétiseront **les éléments plus lourds**.

b) L'évolution des étoiles

Lorsque s'amorce la combustion de l'hydrogène, chaque étoile possède une luminosité à peu près proportionnelle au cube de sa masse. Le temps que dure cette combustion dans le noyau représente la **phase la plus longue de sa vie**. Dans le Soleil qui s'y trouve actuellement, elle durera au total quelque cinq milliards d'années ! Durant cette phase, il nous semble qu'il n'y ait plus aucune évolution chez l'étoile.

b1) Les petites étoiles (1,5 fois la masse solaire) :

Quand il n'y aura plus d'H₂ à transformer en He dans le cœur stellaire, la phase nucléaire se terminera. La durée de cette phase dépend de la masse de l'étoile. En effet, plus une étoile est massive, plus elle brille et donc plus elle épuise rapidement ses réserves en H₂.

A ce moment-là, l'énergie produite par la nucléosynthèse s'épuisant (le cœur de l'étoile ne contient plus que de l'hélium, trop stable pour fusionner), la température va baisser dans l'étoile. La force gravitationnelle prédomine alors et l'étoile va se contracter, ce qui fait de nouveau augmenter la température. Cela va permettre de pouvoir utiliser les molécules d'He se situant en dehors du cœur stellaire. La température montera à 100.10⁹ °C à l'intérieur de l'étoile. La rencontre de 3 noyaux d'He va donner un carbone et de l'oxygène. Grâce à l'énergie dégagée par cette réaction, la contraction va se ralentir. Pendant ce temps, le cœur va continuer à se contracter sous l'effet de la gravitation et transférer cette énergie à la surface de l'étoile qui va amplifier son gonflement tout en se refroidissant. Le diamètre de l'étoile peut être multiplié par un facteur 200, tandis que la baisse de température va se traduire par un décalage du rayonnement vers le rouge : l'étoile devient ce que l'on appelle une **géante rouge**.

La dilatation de ses enveloppes externes aboutit à la dispersion des atomes dans l'espace. Les restes éparpillés de ces enveloppes forment ce que l'on appelle une **nébuleuse planétaire**. Celle-ci va se disperser dans le milieu interstellaire en quelques centaines de milliers d'années.

Le processus s'arrête lorsque tout l'hélium est épuisé et que la température n'est pas suffisante pour amorcer la fusion du carbone : le cœur de l'étoile, constitué d'atomes de C principalement et d'oxygène, n'est plus le siège de réactions thermonucléaires. L'étoile est alors une **naine blanche** ayant une densité très élevée.

Les naines blanches gardent la rotation de l'étoile initiale tout en étant beaucoup plus petites. Elles ne peuvent que rayonner leur chaleur résiduelle en se refroidissant cependant. Une fois leur température assez basse, elles deviennent des astres morts ou des **naines noires**.

On peut suivre aisément cette évolution des étoiles grâce au **diagramme HR** (de Hertzsprung- Russel) ci-dessous.

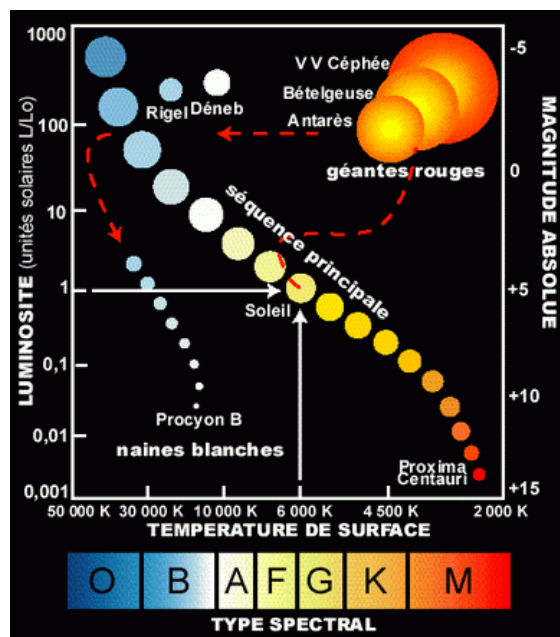
Un corps, chauffé à une température déterminée, émet un rayonnement spécifique. Les étoiles en fonction de leur température change de type spectrale du rouge au bleu,

Type spectrale	Couleur	Température moyenne de surface
W	bleue	35000-50000
O	bleue-blanche	25000-35000
B	bleue-blanche	10000-25000
A	blanche	7500-10000
F	jaunâtre	6000-7500
G	jaune	5000-6000
K	orange	3500-5.00
M	rouge	<3500

Le rayonnement à 3°K, ou rayonnement fossile, est celui qui se répand dans une enceinte refroidie à cette température. On le retrouve partout dans l'univers.

Dans le diagramme HR, toutes les étoiles peuvent être représentées par un point dans un plan dont l'axe horizontal est gradué en température de surface (ou en couleur), donc en classe spectrale, tandis que les luminosités (quantité totale d'énergie émise) figurent sur l'axe vertical. Ce diagramme permet donc de classer les étoiles, c'est un outil indispensable pour décrire les propriétés et l'évolution d'une étoile. Ainsi voyons-nous:

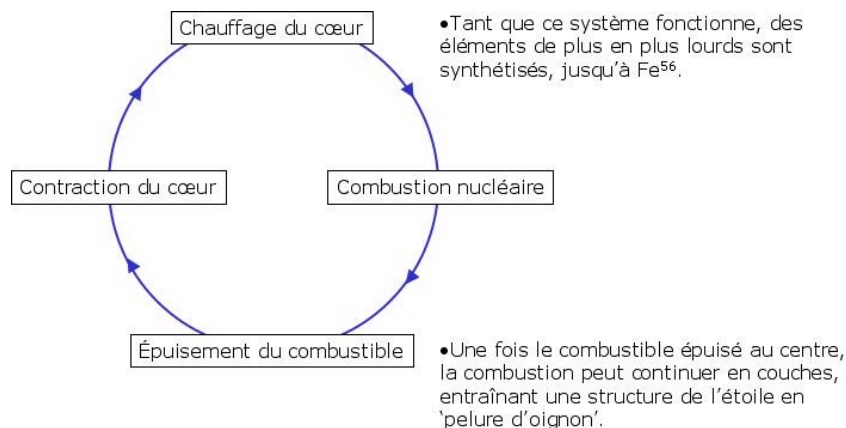
- une bande étroite traverse notamment en diagonale tout le diagramme. C'est la fameuse **séquence principale** qui rassemble toutes les étoiles qui, quel que soit leur âge, brûlent encore de l'hydrogène dans leur cœur;
- dans le coin supérieur gauche, se trouvent **les étoiles de type O et B** - les plus chaudes et les plus bleues - et en bas à droite, **les naines rouges de classe M**. Il apparaît ainsi très clairement qu'une étoile passe la plus grande partie de son existence à brûler son hydrogène. Son évolution ultérieure se traduira par des déplacements, voire des aller-retours sur ce diagramme.
- les autres zones regroupent les étoiles évoluées qui ont épuisé leurs réserves d'hydrogène. Au-dessus de la séquence principale dont elles se sont échappées, **les géantes et les supergéantes rouges** sont encore des réacteurs thermo-nucléaires. Mais elles brûlent des éléments chimiques différents, tels que l'hélium, le carbone ou l'oxygène.
- en dessous de la séquence principale, on trouve les étoiles mourantes, comme **les naines blanches**, qui s'éteignent à petit feu.



b2) Les grosses étoiles (plus de 1,5 fois la masse solaire)

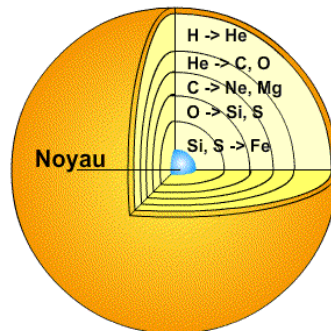
Le mécanisme de leur naissance est voisin de celui des petites étoiles mais il est beaucoup plus rapide (car massives, elles ont des températures centrales beaucoup plus élevées; elles s'éteignent donc rapidement, après trois ou quatre millions d'années). Les protons hydrogènes produisent de l'hélium par les réactions thermonucléaires surtout.

Alors que la production d'une étoile peu massive s'arrête au carbone, une étoile massive est capable d'engendrer en son cœur des températures et des pressions assez élevées pour amorcer toute une série de réactions de "combustion" de plus en plus complexes, en commençant par la combustion du carbone en néon, sodium et magnésium, puis la combustion du néon en oxygène et enfin celle de l'oxygène en silicium. Les "cendres" de chaque réaction s'accumulent au centre de l'étoile pour servir ensuite de carburant à la combustion suivante. L'étoile finit donc par avoir une structure en pelure d'oignon, avec au centre un cœur de fer, puis une couche de silicium, une couche d'oxygène, une couche de carbone, une couche d'hélium pour finir par l'enveloppe d'hydrogène.



Après une nouvelle contraction. La température atteint $35\,109\,^{\circ}\text{C}$! Des noyaux de plus en plus lourds se forment jusqu'au fer (Fe), nickel (Ni) et du cobalt (Co). Ces étapes sont de plus en plus courtes. Pendant cette évolution, la taille de l'étoile s'agrandit pour devenir une **géante bleue** puis une **supergéante rouge**.

Ainsi, en quelques milliers d'années, une étoile engendre tour à tour des noyaux de masse de plus en plus grande : du silicium au groupe des métaux. La combinaison des neutrons aux métaux permet ensuite l'apparition de noyaux plus lourds (U^{238}).

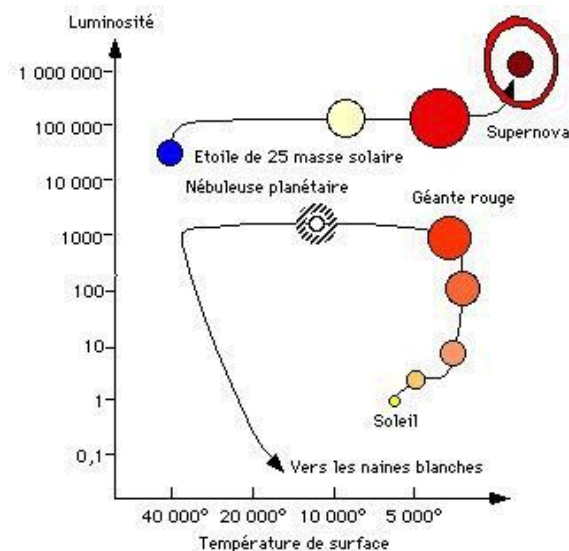


structure dite en «pelure d'oignon» d'une super-géante juste avant l'effondrement du cœur de fer et l'explosion de la supernova (les différentes couches concentriques correspondent à des réactions de fusion différentes).

Quand le cœur de l'étoile approche les 5 milliards de degrés, l'étoile va se contracter rapidement, puis s'effondrer. Ceci va provoquer une formidable explosion : c'est une **supernova**. Les produits des phases de fusion vont être expulsés dans l'espace, puis se refroidir, formant un nuage appelé rémanent de supernova. Mais contrairement à la nébuleuse primordiale qui a donné naissance à l'étoile, cette fois, la nébuleuse contient des éléments lourds et plus complexes produits par l'étoile. Tous les atomes qui composent notre corps et notre planète sont issus de la nucléosynthèse stellaire.

Au moment de l'explosion, l'étoile n'est pas entièrement dispersée dans l'espace. Sa partie centrale se replie sur elle-même. Sa densité augmente énormément. Le cœur de l'étoile devient un seul et gigantesque noyau de neutrons: il en résulte une **étoile à neutrons** ou un **pulsar**.

Il semblerait, dans certains cas, que certains résidus de supernova puissent être encore plus denses qu'une étoile à neutrons. Tellement denses, que la gravité empêcherait la lumière de s'en échapper. Un tel astre est appelé **trou noir**. Cependant, puisque même les radiations électromagnétiques ne peuvent s'en extraire, on ne peut les observer directement. On n'a donc pas la preuve de leur existence, même si certains phénomènes observés suggèrent la présence d'un trou noir.



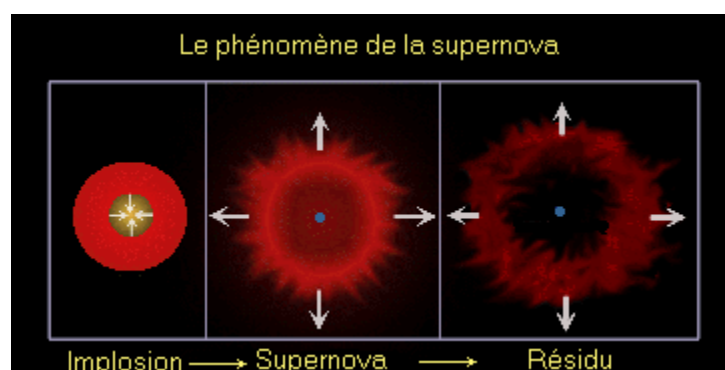
évolution de deux types d'étoiles. La première semblable au soleil passe par le stade géante rouge avant de donner une naine blanche qui se refroidira lentement. La seconde, étoile massive de plus de 1,5 fois la masse solaire, passe par le stade des supergéantes et donne une supernova.

4) Novae et supernovae

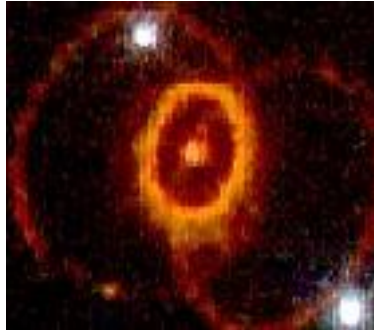
Ces deux formations stellaires correspondent à la fin explosive de certaines étoiles. Phénomènes exceptionnellement lumineux, les supernovae peuvent briller pendant quelques heures autant que toute les étoiles d'une petite galaxie.

Lorsque la masse de l'étoile est très importante (supergéante), pour compenser la perte des neutrinos, l'étoile se contracte de plus en plus, puis s'effondre. On arrive à une température de $5 \cdot 10^9$ °C. Les réactions thermonucléaires ne sont plus suffisantes pour contrebalancer la gravitation. La contraction de l'étoile mourante va conduire à une implosion de son cœur ($100 \cdot 10^6$ fois le soleil). C'est une supernova. Après que l'implosion ait eue lieu, une onde de choc en retour balaie toutes les couches et les disperse dans l'espace.

La matière stellaire, évacuée dans l'espace, se dilue et se refroidit. Mais, elle n'est pas perdue car elle contient les noyaux lourds. Ils entreront dans la composition du nuage interstellaire et participeront à la formation de nouvelles étoiles mais aussi de planètes. Au niveau du cœur de l'étoile, il reste un noyau dense : l'étoile à neutrons.



effondrement brutal du cœur sur lui-même entraînant les couches externes de l'étoile.



la supernova 1987A est la première que les télescopes actuels ont eu la chance d'observer. Vue ici à travers l'objectif du télescope spatial Hubble, on voit bien l'anneau de matière stellaire éjectée de l'étoile lors de son explosion.

5) Etoiles à neutrons, Pulsars, Trous noirs et Quasars

Autres que les galaxies, notre cosmos est peuplé d'objets d'une puissance extrême, parmi ceux-ci, les étoiles à neutrons, les pulsars, les trous noirs et les Quasars.

a) L'étoile à neutrons : après l'explosion de la supernova, seul subsiste le noyau, car les couches externes ont été expulsées dans l'espace interstellaire. C'est donc le cœur d'une supernova composé uniquement de neutrons, d'où cette dénomination d'étoile à neutrons. En raison d'une forte densité régnant au centre de l'étoile, les protons se sont transformés en neutrons.

Dans la soupe ardente de neutrons, des neutrinos sont créés spontanément. Ils quittent l'étoile et évacuent toute sa chaleur interne, l'étoile à neutrons refroidit.

Quand la masse de l'étoile est supérieure à 1,8 masse solaire, le refroidissement a des conséquences catastrophiques : les neutrons ne peuvent résister à la gravitation et sont littéralement écrasés sous leur propre poids. L'étoile est condamnée à devenir un **trou noir**.

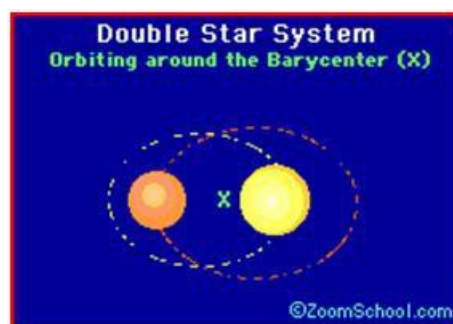
Au contraire, si la masse est inférieure à 1,8 masse solaire, elle peut trouver un équilibre paisible et se refroidir complètement.

b) Les pulsars : sont des étoiles à neutrons qui, à l'observation, s'allument et s'éteignent plusieurs fois par seconde, selon le principe des phares. En effet, seule une fraction de leur surface émet de la lumière. Les périodes de pulsations de pulsars sont très variables et dépendent de la vitesse de rotation de l'étoile à neutrons. Ces périodes vont de 1,5 ms à 8,5 secondes. Cette pulsation tend cependant à se fatiguer au fil des années, à mesure que l'énergie de rotation décroît. Si le pulsar tourne trop vite il se désintègrera sous la force centrifuge provoquée par sa rotation.

Les pulsars possèdent un champ magnétique très intense et émettent des rayonnements radios à partir de leurs pôles magnétiques. Les scientifiques estiment qu'un pulsar naît tous les 60-330 ans dans notre galaxie, alors que le taux de formation de supernovae est d'un à tous les 50 ans environ.

Les pulsars ont souvent une étoile compagne qui est à l'origine de leur rotation rapide. Ce peut être une **naine blanche** ou une **géante rouge**.

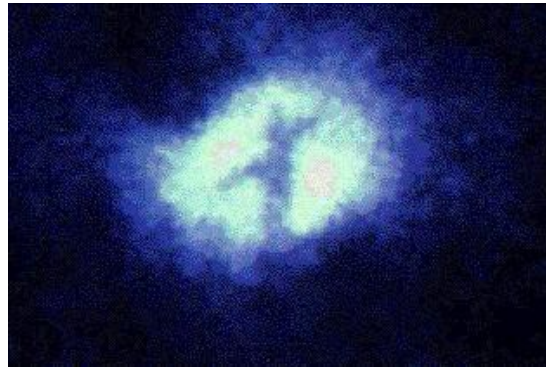
Les **étoiles doubles** sont en fait assez courantes. Ce sont deux étoiles très proches qui sont en révolution autour de leur compagne. On ne peut distinguer les deux astres que par analyse de leurs raies spectrales.



étoile double ou système binaire

c) Les trous noirs

Les trous noirs n'existent qu'en théorie qui prédit que des étoiles massives (de plus de 30 masses solaires environ), s'effondrent sur elles-mêmes sans que rien ne puisse stopper le processus, la gravité est énorme, elle est si importante que même la lumière (composée de particules, les photons) ne peut s'en échapper. C'est pourquoi il est si difficile de détecter des trous noirs.



la galaxie M51 sous l'oeil du télescope spatial Hubble. La croix au centre de cette galaxie signifierait la présence d'un trou noir en son centre.

d) Les quasars

Les QUASARS (découverts pour la première fois en 1963) sont des objets se situant aux limites de notre univers visible. Les quasars se retrouvent au sein de galaxies hôtes dans lesquelles ils constituent le noyau central. La plupart de ces quasars ont une apparence stellaire, d'où leur nom Quasi Stellar objects. Les quasars peuvent résider dans tout type de galaxies.

Les astronomes étaient très surpris de pouvoir apercevoir des objets aussi lointains. Cette grande distance implique que les Quasars produisent une énergie phénoménale pour être détectés par nos télescopes terrestres. Les luminosités de ces objets sont de l'ordre de 10^{45} à 10^{48} erg / s. En effet, les quasars sont les plus puissants émetteurs de rayonnements. La source de ce rayonnement est concentrée dans une région minuscule au centre de la galaxie.

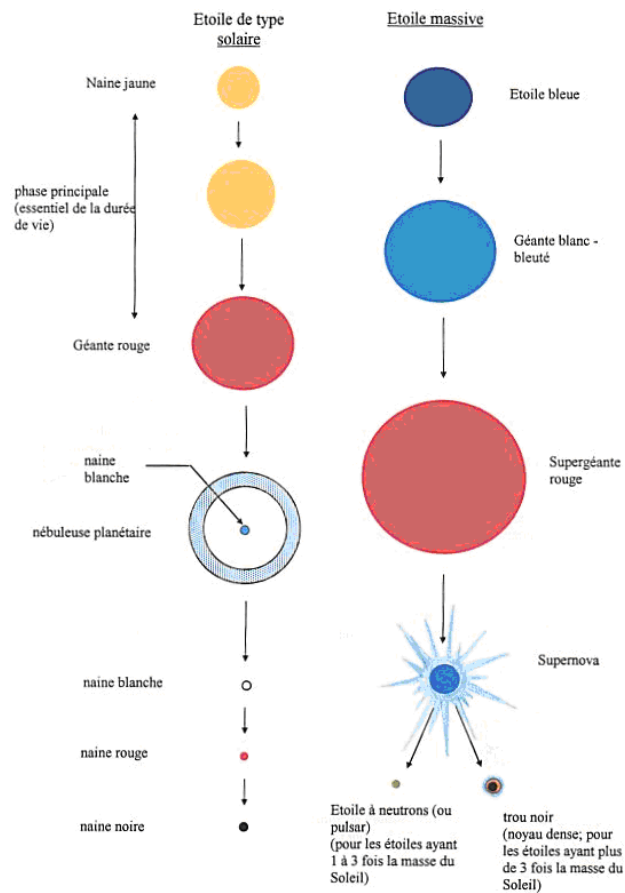
L'origine de ce rayonnement pourrait s'expliquer par la présence d'un trou noir de plusieurs millions de masses solaires qui attirerait et dévorerait tout ce qui se trouve près de lui : nuages interstellaires, planètes, étoiles entières, vaisseaux spatiaux,... Ces corps, violemment accélérés, tombent sur lui à une vitesse prodigieuse, bousculés par leur chute, ils se réchauffent et brillent puissamment.

Certains de ces quasars sont vieux de 12 milliards d'années.



deux quasars (dont un en haut à gauche) qui illuminent le ciel de leurs rayonnements ultraviolets et de leurs émissions radio (donc invisible à l'oeil)

Résumé des phases d'évolution stellaire en fonction de la masse initiale de l'étoile.



B- LE SYSTEME SOLAIRE

Le Système solaire est le système planétaire auquel appartient la Terre. Il fait partie de la galaxie appelée Voie lactée, situé à environ 8 kpc ($\sim 26\,100$ a.l.) de son centre il effectue une révolution en 225 à 250 millions d'années. L'héliopause, limite magnétique du Système solaire, est définie par l'arrêt des vents solaires face au vent galactique. Bien au-delà se trouve le nuage d'Oort, sphère d'objets épars. La limite gravitationnelle du Système solaire se situe bien plus loin encore, jusqu'à 1 ou 2 années-lumière du Soleil.

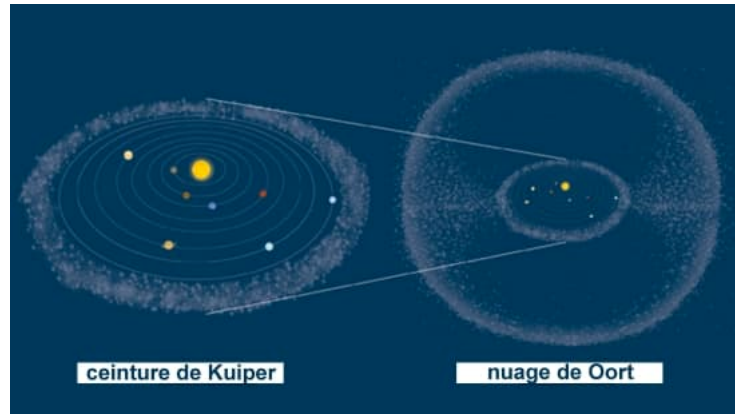
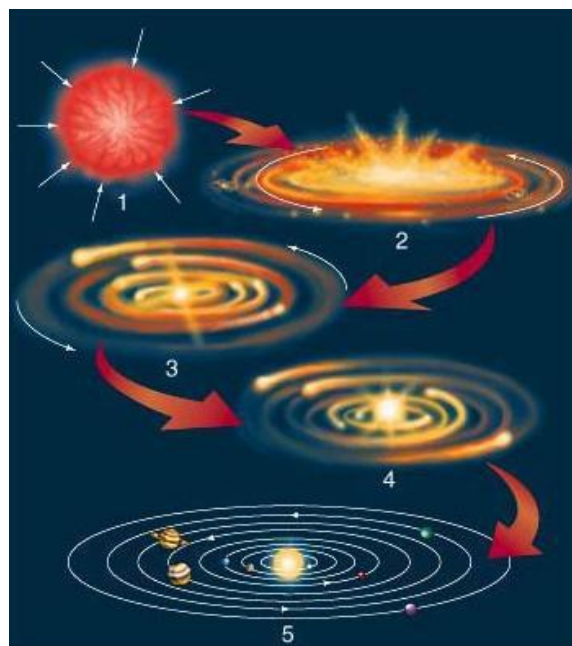


Schéma montrant les emplacements respectifs du Système solaire, de la ceinture de Kuiper (au-delà de l'orbite de Neptune) et du nuage de Oort (entre 0,6 et 1,6 années-lumière du Soleil).

1) Formation

La Voie Lactée contient de nombreux nuages interstellaires, issus de nébuleuses. Lorsque le nuage originel du système solaire commence à se comprimer, plusieurs étoiles naissent, certaines se transforment rapidement en supernova. L'explosion qui en est liée favorise l'agglomération des poussières en éléments plus gros.

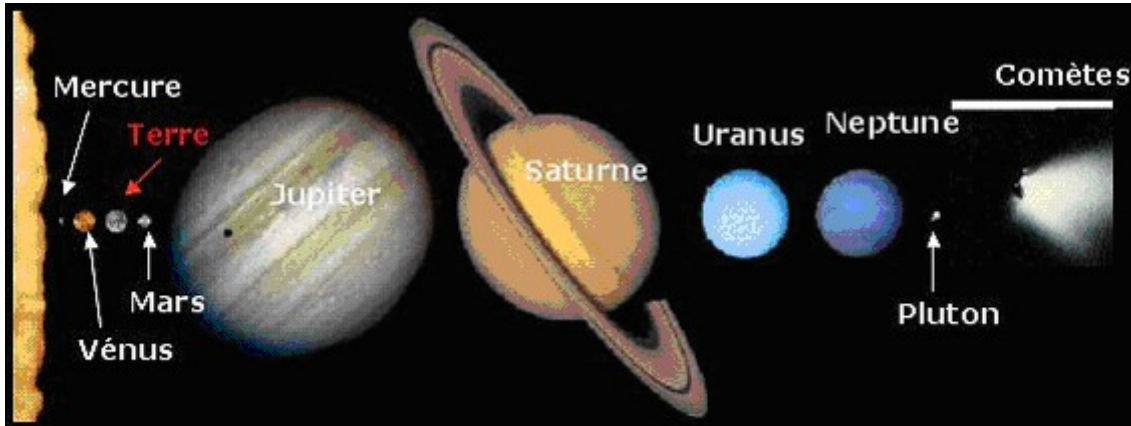
Le nuage s'aplatit en disque épais du fait de la rotation qui entraîne la concentration des poussières et des agrégats près de son centre, autour de l'axe de rotation. Le disque s'amincit et s'élargit. Les agrégats formés suivent une orbite circulaire.



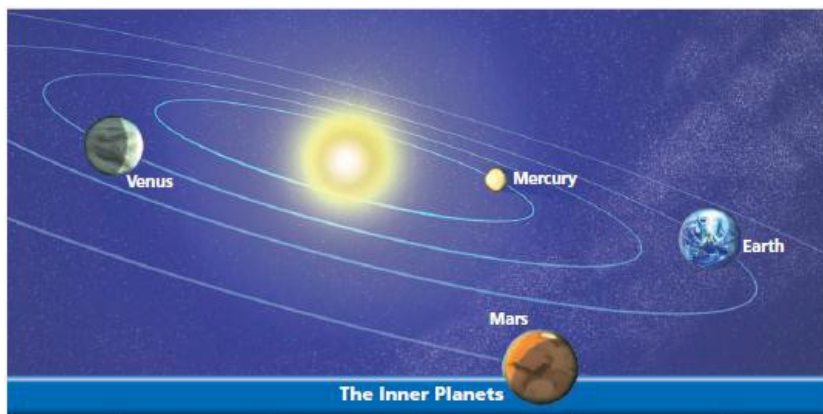
Les poussières, lors de leur agglomération dans un domaine proche du soleil, perdent les matières volatiles (H_2 , He...). Au-delà de 750 millions de km du soleil, par contre, les poussières et les matières volatiles coexistent.

2) Organisation du système solaire

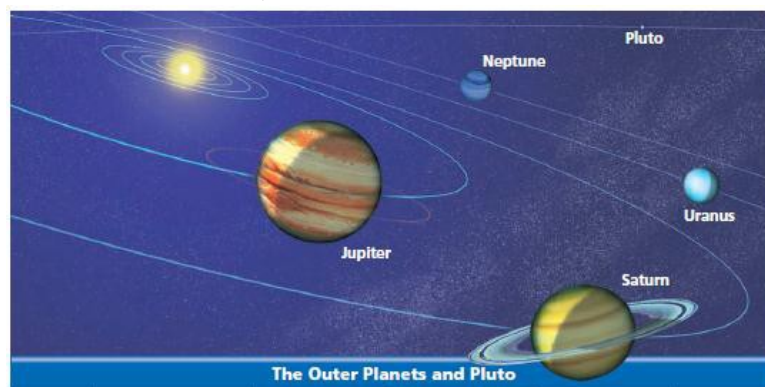
Le Système Solaire est l'ensemble des objets gouvernés par l'attraction gravitationnelle du soleil. Il s'agit de huit planètes. Contrairement aux étoiles, les planètes n'émettent pas de lumière ; elles sont éclairées par le Soleil et renvoient sa lumière



a) Les planètes telluriques (ou planètes internes): ces planètes sont petites, peu massives et denses et à atmosphère réduite. L'archétype de cette classe est la planète Terre qui en est d'ailleurs le plus gros représentant. Il s'agit de : **Mercure, Venus, Terre, Mars**



b) Les planètes géantes (ou planètes externes): On parle aussi de planètes gazeuses ou de planètes joviennes (semblable à Jupiter). Ces planètes possèdent toutefois des satellites de type tellurique. L'atmosphère de ces planètes est proche de la composition de la nébuleuse primitive. Toutes possèdent des anneaux constitués d'une myriade de blocs de glace, de roches et de poussières. Ce sont les restes des particules et agrégats du bombardement d'accrétion, prisonniers de l'attraction des planètes. Il s'agit de : **Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune.**

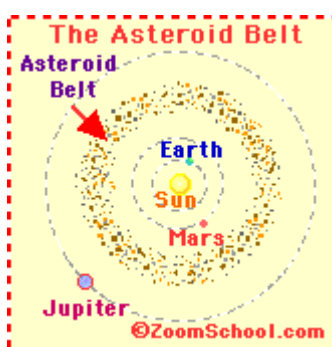


c) Et le reste...

- Des **planètes naines** comme Cérès ou Pluton (pluton n'étant plus considéré comme planète depuis 2006),

Des **astéroïdes** (environ 300000 en 2006) formant une ceinture située entre Mars et Jupiter, dont certains sont assez imposants (33 ont plus de 200 km de diamètre). Ces astéroïdes sont les **étoiles filantes** (météores) et **météorites**, qui frappent la Terre lorsqu'ils quittent leur orbite et rencontre notre planète. Le dégazage de ces météorites donne une atmosphère voisine de celle qui se retrouve dans les émissions gazeuses volcaniques de la Terre : c'est l'atmosphère de base des planètes telluriques.

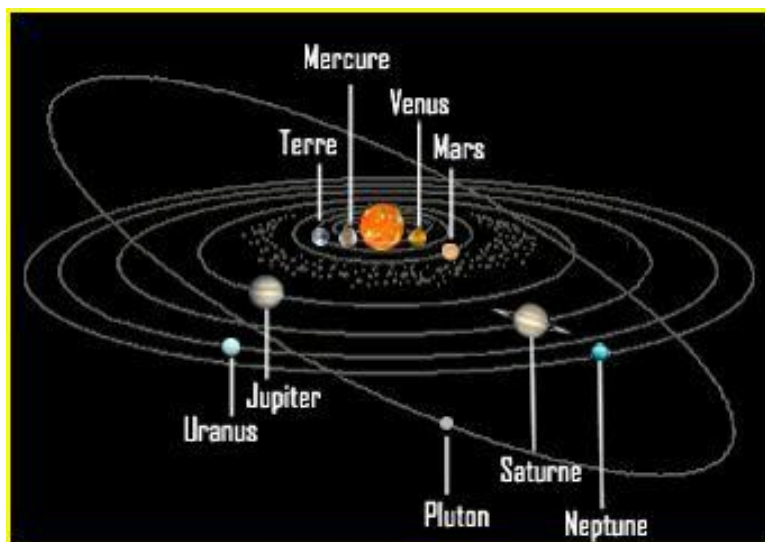
- Des **comètes** (environ 1000), noyaux de glaces de poussières minérales. La queue des comètes provient des radiations solaires qui subliment les glaces et arrachent les poussières.
- Les **petits corps** du système solaire externe (environ 1000 en 2006) : les Centaures et les objets transneptuniens,
- Mais aussi : **poussières interplanétaires, plasma,**



La ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter.

d) Propriétés faisant l'unité du système solaire :

- ♣ Les planètes et la plupart des astéroïdes tournent autour du Soleil sur des orbites elliptiques presque circulaires situés dans le même plan «**écliptique**» perpendiculaire à l'axe de rotation du soleil.



Orbites des planètes

Remarque : Pluton n'est pas dans le plan de l'écliptique (argument ajouté par les astrophysiciens à celui de sa taille, entre d'autres, pour ne plus le considérer depuis 2006 comme une vraie planète de notre système solaire, mais comme une planète naine).

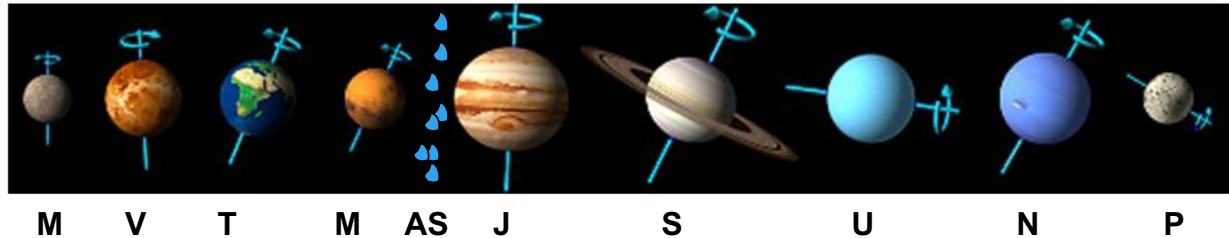
- ♣ La période de révolution des planètes dépend de leur distance par rapport au soleil, les plus éloignées tournent le plus lentement, et ces révolutions se font toutes dans le même sens que la rotation du soleil : La période ("année") au carré est proportionnelle au cube de la distance moyenne au Soleil (3ème loi de Kepler (Loi harmonique)) $P^2 = D^3$

♣ Leur distance par rapport au soleil obéit à une loi simple (loi de bode découverte en 1772) : chaque planète est presque deux fois plus éloignée du soleil que sa voisine intérieure :

$$D = (0,4 + 0,3 \times 2^n) \text{ UA.}$$

Avec n = - infini pour Mercure, 0 pour Venus, 1 pour Terre, 2 pour Mars, 3 pour la ceinture d'astéroïdes, 4 pour Jupiter etc....

♣ La rotation des planètes sur elles même se fait selon un axe sub-perpendiculaire au plan de l'écliptique et dans le même sens que leur révolution (sauf pour vénus et Uranus qui tournent en sens inverse)



La distance approximative entre les planètes et le Soleil ainsi que d'autres informations statistiques sur ces planètes sont résumées dans le tableau ci-après

	Distance (AU) Par rapport à la Terre	Rayon (km)	Masse (par rapport à la Terre)	Révolution (en jours)	Rotation (jours ou heures)	# Lunes (satellites)	Inclin_orbi / l'écliptique	Inclinaison équateur	Excentricité Orbitale	Densité (g/cm³)
Soleil	0	696.000	332.800		25-36	9	---	---	---	1,41
Mercure	0,39	2.962	0,05	87	58,7 j	0	7°	0,3°	0,21	5,43
Vénus	0,72	6.051	0,89	224	243 j	0	3,39°	3°	0,01	5,25
Terre	1,0	6.378	1,00	365	24 h	1	0,00	23°	0,02	5,52
Mars	1,5	3.392	1,07	686	24,6h	2	1,85°	25°	0,09	3,95
Jupiter	5,2	71.492	318	4.332	9,8 h	16	1,31°	3°	0,05	1,33
Saturne	9,5	60.268	95	10.759	10,6 h	18	2,49	27°	0,06	0,69
Uranus	19,2	25.559	15	30.685	17,2 h	15	0,77	98°	0,05	1,29
Neptune	30,1	24.764	17	60.190	16,1 h	8	1,77	30°	0,01	1,64

Tableau regroupant les propriétés physiques des différents planètes du système solaire

Ces propriétés montrent que le Système Solaire qui s'est formé à partir d'un même nuage de gaz et de poussière qui s'est aplati au fur et à mesure de sa contraction (voir modèle plus haut).

La composition globale des planètes telluriques est **rocheuse**, c'est à dire constituée de silicates, de fer et de nickel. Ce qui donne une **densité d'environ 5 g/cm³**.

Les planètes telluriques se sont formées par **accrétion de planétésimaux**. En conséquence, durant cette phase d'accrétion initiale, les planètes sont restées

- **chaudes**
- **homogènes**
- **liquides**

Ensuite, à cause de la **gravitation**, on assiste à la chute des **matériaux les plus lourds** (fer, nickel) **vers le centre**: c'est le phénomène de la **différenciation** qui conduit à la formation d'un **noyau plus dense**. Le manteau est constitué de **silicates**. Le refroidissement de la surface donne ensuite lieu à la formation de la croûte solide. Pour la Terre, La densité décroît du noyau (**12 g/cm³**) jusqu'à la croûte (**3 g/cm³**) en passant par le manteau (**5 g/cm³**)

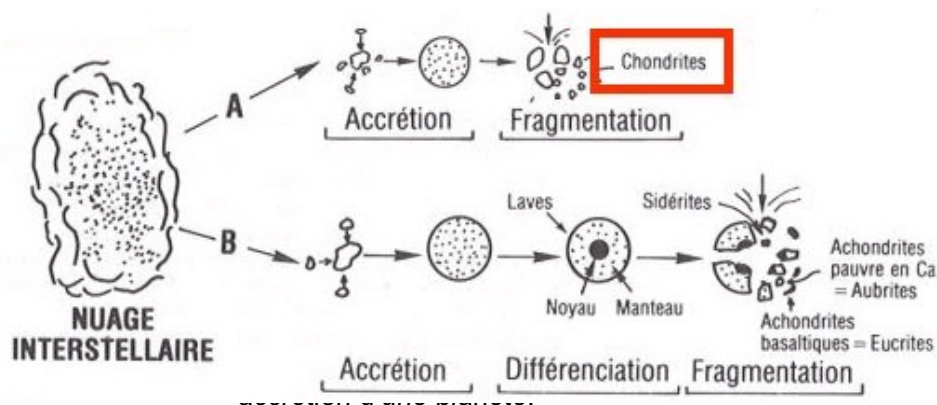
L'activité géologique d'une planète dépend de sa structure interne (manteau liquide, épaisseur de la croûte,...) et sa structure interne dépend de sa température interne. Nous allons voir ci-après comment la chaleur est emmagasinée à l'intérieur de la planète, et comment cette chaleur s'échappe vers l'extérieur.

Comment l'intérieur de la planète est-il chauffé?

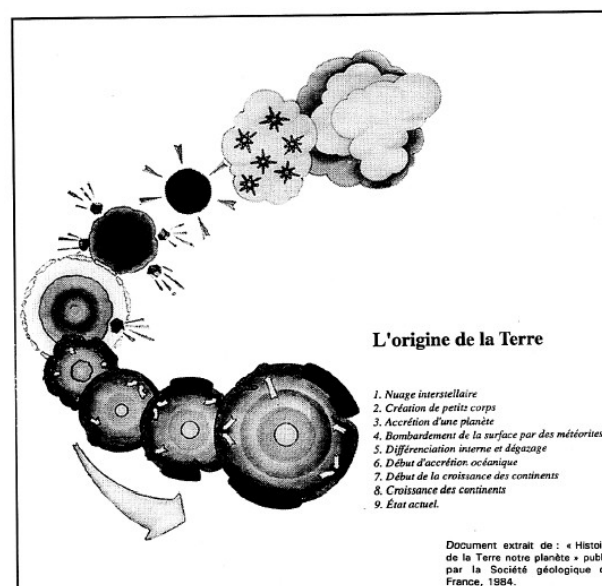
Trois principales sources de chaleur contribuent à chauffer l'intérieur d'une planète: l'accrétion, la différenciation, et la radioactivité. Une quatrième source appelée effet de marée, n'est pas important pour les planètes telluriques mais joue un rôle majeur pour les satellites galiléens, en particulier Io.

• L'**accrétion** est la première source d'énergie interne pour les planètes telluriques. L'accrétion est le phénomène par lequel un **embryon planétaire grossit en agglomérant les planétésimaux** alentours par collision. L'**énergie cinétique** des impacteurs ($mv^2/2$) est transformée en **énergie thermique** qui s'ajoute à l'**énergie interne** de la planète. Les multiples

impacts violents qui ont prévalu dans les premiers temps de la formation des planètes ont déposé une telle quantité d'énergie que la planète entière était en fusion (**état liquide**).



• Cet état liquide généralisé a permis au processus de la **différenciation** d'entrer en jeu. Sous l'effet de la **gravitation**, les **matériaux les plus denses** (les métaux) coulent dans le **noyau** de la planète alors que les **roches les plus légères** restent à la **surface**. La différenciation produit de la chaleur en transformant l'**énergie gravitationnelle en énergie thermique**.



différenciation de la Terre.

• La troisième source d'énergie provient de la **décroissance radioactive** d'éléments comme l'**uranium**, le **potassium**, etc... Quand les noyaux radioactifs se désintègrent, des particules sub-atomiques sont éjectés à très grande vitesse, frappent les atomes voisins les chauffant ainsi. La radioactivité transfère ainsi une partie de la masse-énergie ($E = mc^2$) de l'élément radioactif en énergie thermique pour l'intérieur de la planète.

Comment l'intérieur de la planète se refroidit ?

La **chaleur emmagasinée** dans la planète **s'échappe continuellement** de l'intérieur. Cette évacuation se fait de l'intérieur chaud vers la surface plus froide au travers de **quatre processus principaux**: la conduction, la convection, le volcanisme et la tectonique des plaques :

- La **convection** (dans une cellule convective du manteau liquide, de la roche chaude monte tandis que de la roche plus froide redescend).
- La **conduction** (qui transporte la chaleur dans la croûte rigide).
- Le **volcanisme** (qui amène la lave en fusion à la surface).
- Le dernier processus est la **tectonique des plaques** (voir module de Géologie 2).

Température d'équilibre

Le **Soleil** est la **source d'énergie principale** reçue par les planètes. La **température d'équilibre** à la surface des planètes va dépendre de leur distance au Soleil. Plus on est près du Soleil plus il fera chaud (Mercure) et plus on est loin plus il fera froid (Mars). Le mécanisme physique qui permet ce chauffage est **l'absorption par la surface du rayonnement solaire** émis dans le domaine Ultra-Violet (**UV**) et **visible**. En fonction des **propriétés de la surface** (composition, relief, océans, calotte polaire, ...) et de la **latitude**, on absorbera plus ou moins bien ce rayonnement, tandis que **l'énergie solaire non absorbée sera réfléchi**e par la surface vers l'espace. Ce coefficient de réflexion est appelé **albédo**, il dépend aussi de la couverture nuageuse.

Effet de serre

Tout d'abord, rappelons que la **surface absorbe** l'énergie solaire dans le **domaine UV-visible**, puis elle se refroidit en émettant un rayonnement Infrarouge (**IR**). Ce rayonnement IR se dirige vers l'espace en passant par l'atmosphère de la planète, avec laquelle il **peut interagir**. Les **gaz** à effet de serre tels que l'**eau** (H_2O), le dioxyde de carbone ou **gaz carbonique** (CO_2), et le **méthane** (CH_4) présents dans une atmosphère **absorbent le rayonnement IR et le re-émettent dans toutes les directions, et notamment vers la surface**, favorisant ainsi une **accumulation de l'énergie thermique**, et par conséquent une **augmentation de la chaleur**. Ainsi, la **température moyenne** à la surface peut être **supérieure à la température d'équilibre** de la planète (Vénus et Terre). L'effet de serre est notablement présent lorsque l'on a une atmosphère relativement transparente dans le domaine UV-visible et opaque dans l'infrarouge. On notera que la présence de nuages peut aussi augmenter l'effet de serre (par exemple les nuages d'acide sulfurique sur Vénus). L'effet de serre augmente la température à la surface de Vénus, de la Terre et de Mars respectivement de 500, 35 et 5°C.

Quelques données sur notre étoile : Le Soleil

1. - Structure

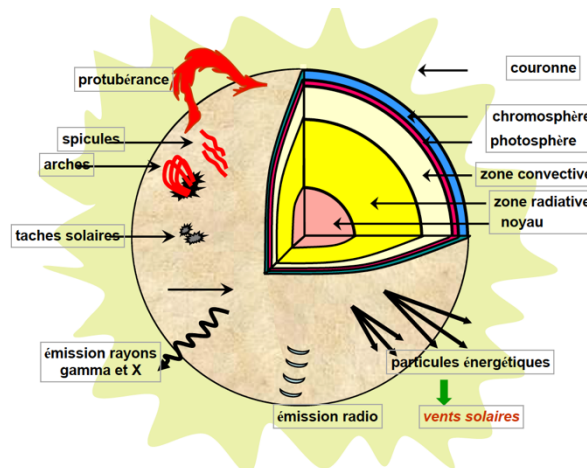
Le Soleil est une sphère de rayon d'environ 696.000 km. Sa température de surface est de 5.800°K; elle augmente jusqu'à 15.000.000 °K au centre. Il accomplit une rotation complète en 25 jours à l'équateur et 36 jours aux pôles. Ce phénomène, appelé "rotation différentielle" est dû au fait que le Soleil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

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

Le Soleil émet des ondes radio, des rayons X, des particules énergétiques, une quantité importante de neutrinos, en plus de la lumière visible. La production d'énergie du Soleil (386 milliards de milliards de mégawatts) est produite par la fusion nucléaire.

L'étoile Soleil est constituée de plusieurs couches de gaz ayant chacune des propriétés thermodynamiques particulières (fig.4). De l'intérieur vers l'extérieur on distingue :

- ✓ Le noyau ou cœur (15 millions de °C), théâtre des réactions de fusions nucléaires
- ✓ La zone radiative
- ✓ La zone convective, cercles de chaleur qui remontent l'énergie à la surface
- ✓ La photosphère (surface du Soleil, environ 5 500°C)
- ✓ La chromosphère (basse atmosphère du Soleil, non marquée sur l'image de la structure en coupe du Soleil)
- ✓ La couronne solaire (haute atmosphère du Soleil, 1 à 2 millions de °C)



Organisation du Soleil

2- L'activité solaire

2.1. - Le champ magnétique solaire

Le Soleil est caractérisé par un champ magnétique très puissant (en comparaison au standard terrestre) et très complexe; il est lié aux courants convectifs à l'intérieur de cette étoile. La région de l'espace dans laquelle le champ magnétique solaire est dominant est appelée héliosphère. Bien que le vent solaire s'échappe en direction radiale du Soleil, la rotation du Soleil donne au champ magnétique une forme de spirale.

Tous les 11 ans, les pôles magnétiques du Soleil s'inversent : On parle donc de cycle solaire qui dure en fait 22 ans. Au moment du maximum d'activité solaire, tous les 11 ans, on observe un grand nombre de taches, regroupées dans des régions actives qui sont le siège d'éruptions.

2.2. - Les protubérances

Les protubérances appartiennent aussi à la photosphère. Elles correspondent à des jets de matière le long de lignes de champ magnétique entre deux taches solaires en formant une arche. Ce jet s'accompagne d'émissions des rayons X, des ondes radioélectriques et des rayons gamma. Les protubérances éruptives sont les plus violentes et peuvent atteindre la vitesse de 600 000 km/h et elles peuvent s'élever jusqu'à plus d'un million de km.

2.3. - Les éruptions solaires

Les éruptions solaires (qu'il ne faut pas confondre avec les protubérances), sont également présentes sur la photosphère. Il s'agit d'un ouragan de particules atomiques qui souffle à 3 millions de km/h qu'on appelle le vent solaire, qui monte toujours en spirale du champ magnétique pour atteindre l'orbite de la Terre. Ces jets de matière rayonnent dans les rayons X et UV.