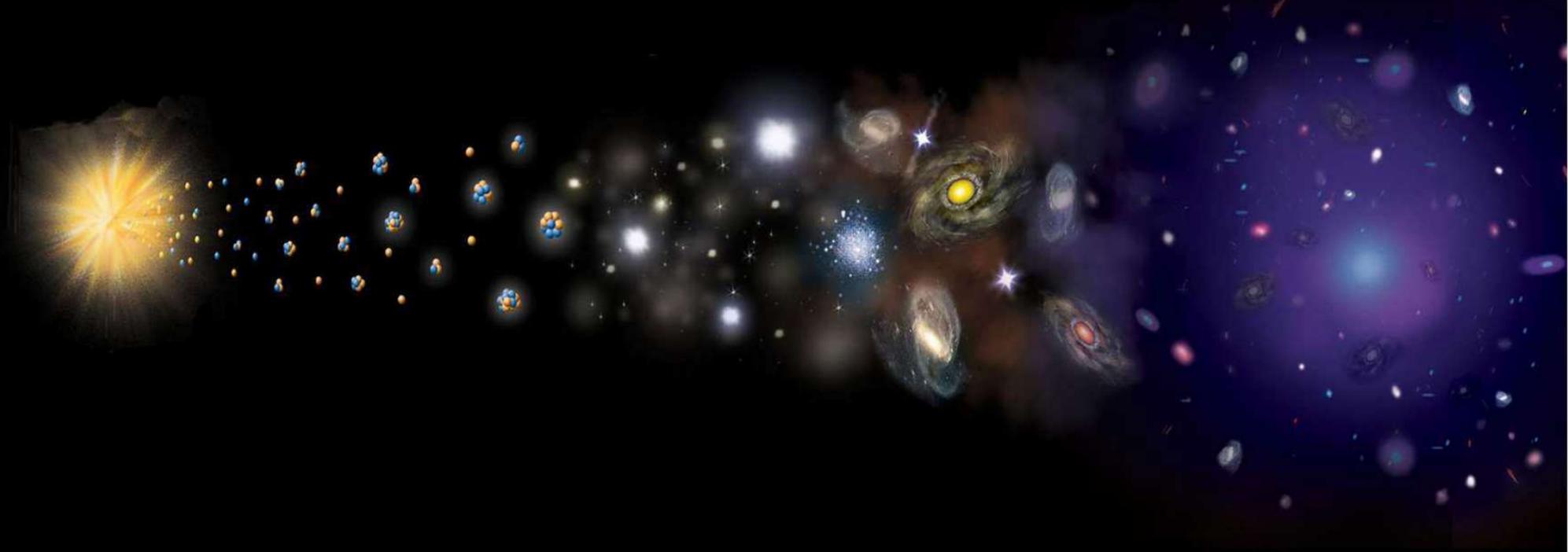


Alain ROBERT

# Petite histoire de l'Univers



du Big Bang à l'apparition  
d'Homo Sapiens



## Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Partage des Conditions Initiales à l'Identique 2.0 France

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/fr/>

### Vous êtes libres :



de reproduire, distribuer et communiquer cette création au public



de modifier cette création

### Selon les conditions suivantes :



**Paternité.** Vous devez citer le nom de l'auteur original de la manière indiquée par l'auteur de l'oeuvre ou le titulaire des droits qui vous confère cette autorisation (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous soutiennent ou approuvent votre utilisation de l'oeuvre).



**Pas d'Utilisation Commerciale.** Vous n'avez pas le droit d'utiliser cette création à des fins commerciales.



**Partage des Conditions Initiales à l'Identique.** Si vous modifiez, transformez ou adaptez cette création, vous n'avez le droit de distribuer la création qui en résulte que sous un contrat identique à celui-ci.

La culture scientifique  
est une composante  
indispensable de la  
culture du citoyen

Orléans



Science-Ecole

Site :

<https://www.science-ecole.fr>

Courriel :

[science.ecole@gmail.com](mailto:science.ecole@gmail.com)

## « Science-Ecole »

C'est par l'éducation, par l'accès à la culture et entre autres à la culture scientifique, que nous donnerons aux enfants d'aujourd'hui, les citoyens de demain, les moyens de se forger leur propre opinion sans se laisser manipuler par les extrémistes de tout poil.

La laïcité n'est pas une opinion ...

... c'est la liberté d'en avoir une.

Depuis la nuit des temps, la curiosité a toujours été le moteur de l'évolution de la race humaine. Partout il s'est trouvé des hommes et de femmes curieux et avides de savoir ce qu'il y a derrière la colline, là-bas à l'horizon.



**Sans cette soif de savoir, nous aurions disparu depuis longtemps.**

Une partie de cette quête du savoir s'est intéressée au spectacle que nous offre le ciel et a permis à nos lointains ancêtres, qui venaient d'inventer l'agriculture, de construire les premiers observatoires astronomiques leur permettant de créer les calendriers indispensables aux travaux des champs (alignements de Carnac, Stonehenge, etc.).



Par la suite, cela a donné l'astronomie, l'astrophysique, l'astrochimie, etc. et permis de construire l'histoire de l'univers que raconte ce dossier.

Si vous souhaitez réaliser une exposition sur le sujet, les fichiers jpg pour impression en format A0 des panneaux correspondants à ces pages sont à votre disposition sur le site Science-Ecole, rubrique « Accès aux dossiers pédagogiques » (bas de page) : <https://www.science-ecole.fr/>

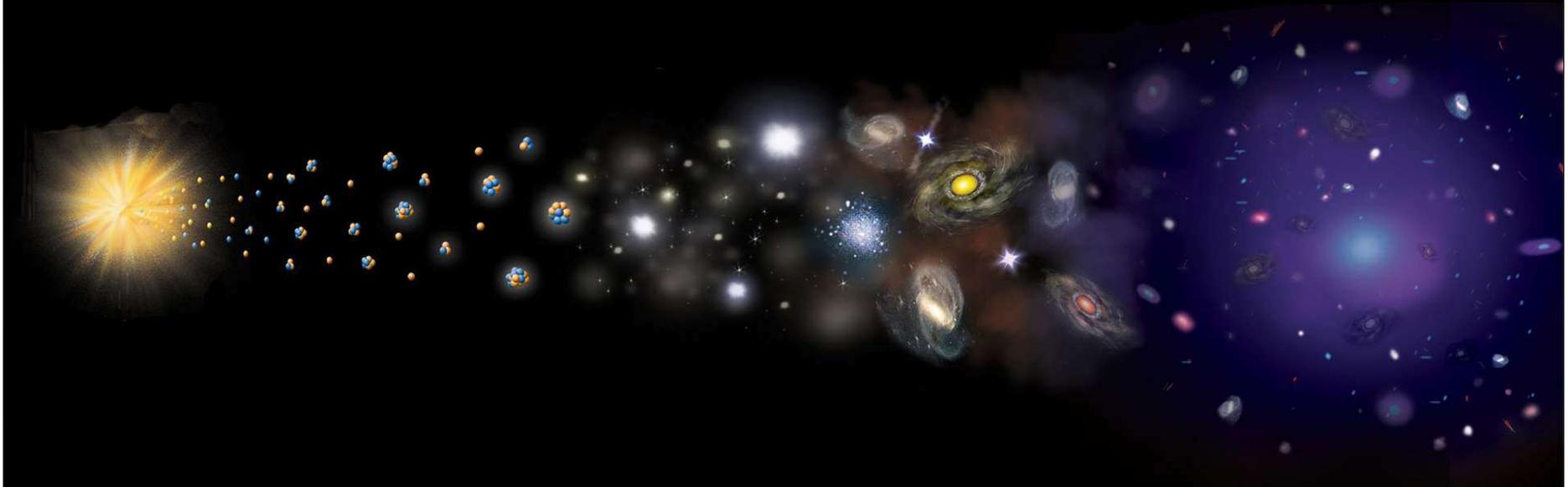


# Le Big Bang

L'histoire reconstituée par les scientifiques commence  
0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 1 secondes ( $10^{-43}$  s)  
après le début de l'Univers.

**Avant, on ne sait pas !**

L'histoire racontée commence donc il y a environ 13,8 milliards d'années.



## Premiers instants

Une inimaginable quantité d'énergie apparaît, dans un tout petit volume.

L'univers est très, très, très chaud :  $10^{32}$  degrés au départ, c'est-à-dire cent mille milliards de milliards de milliards de degrés !

A  $10^{-32}$  secondes, l'univers naissant enfle prodigieusement : c'est la phase d'inflation.

La taille de l'Univers est multipliée par un facteur  $10^{26}$   
(sa taille est multipliée par 100 000 000 000 000 000 000 000).

Vers 1 seconde, les premières particules se forment.

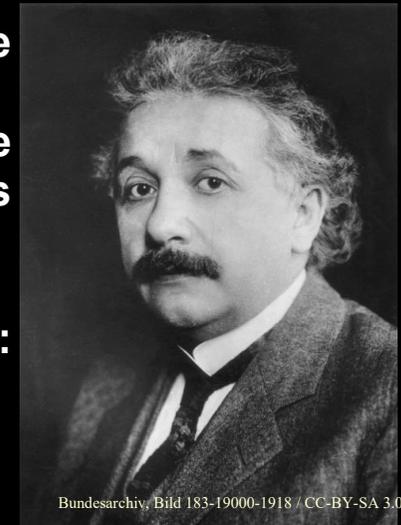
(depuis les travaux d'Albert Einstein, on sait que matière et énergie sont deux aspects d'une même réalité :  $E = M C^2$  ).

Dans cette « soupe » hyper chaude, les particules de matière (protons, neutrons, électrons) interagissent continuellement avec les photons (lumière).

Ces derniers, sans arrêt absorbés et re-émis ne peuvent s'échapper : l'univers ne peut émettre de lumière. Il est opaque.

Cela va durer un peu... l'univers se dilate et se refroidit.

380 000 ans : La température baisse progressivement et atteint environ 3000 degrés



Bundesarchiv, Bild 183-19000-1918 / CC-BY-SA 3.0

# 380 000 ans

(après le Big Bang)

La température est suffisamment basse pour que les électrons se lient durablement aux noyaux pour former des atomes d'hydrogène et d'hélium. Les photons (grains de lumière) peuvent maintenant circuler librement

## L'Univers devient

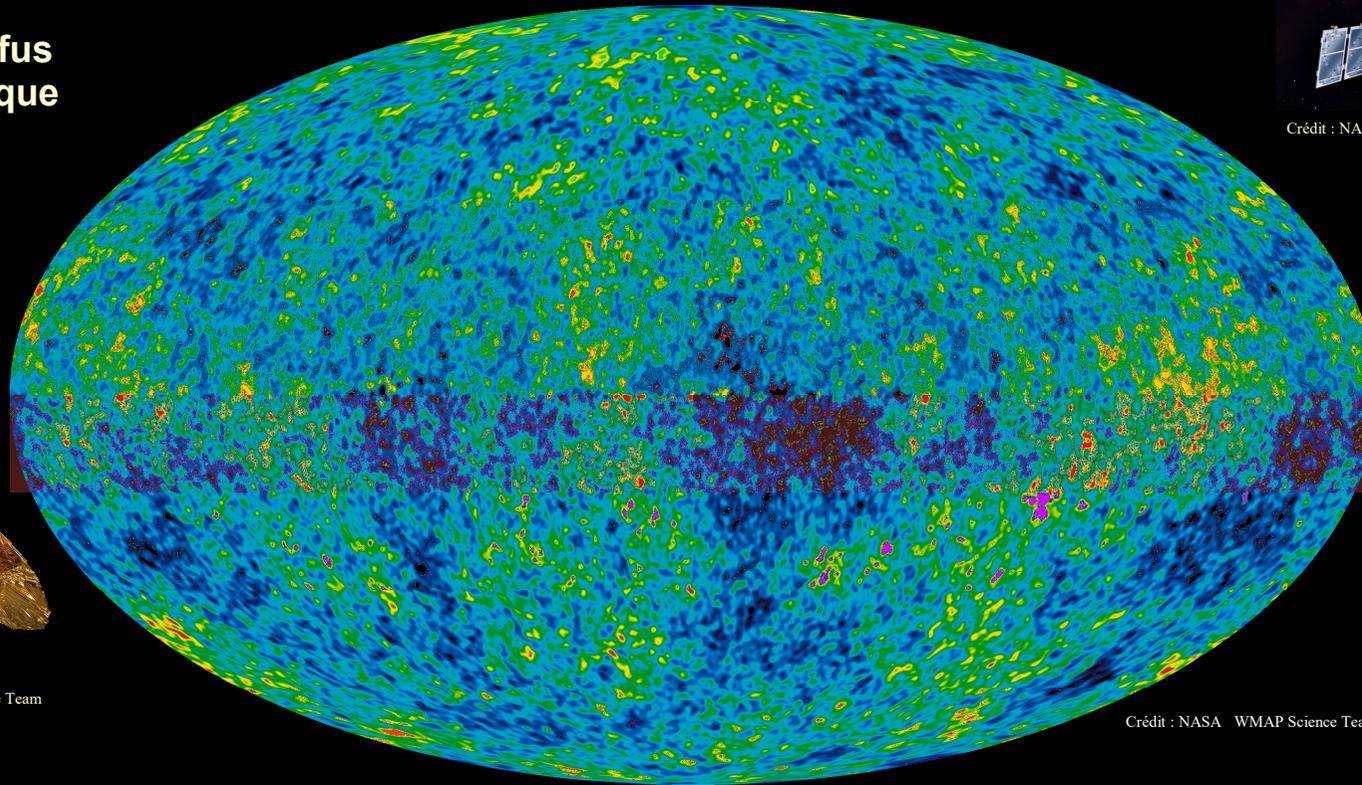
## transparent

# 380 000 ans (après le Big Bang)

Le fond diffus cosmologique



Crédit : NASA / COBE Science Team



Crédit : NASA / WMAP Science Team

Crédit : NASA WMAP Science Team

C'est cette lumière primordiale, émise il y a 13.7 milliards d'années, que les satellites COBE (NASA 1992), WMAP (NASA 2001) et PLANK (ESA 2009) ont « photographiée ».

Aujourd'hui, cette lumière s'est refroidie à 2,725 K (soit environ  $-270$  °C) et demande donc les techniques d'enregistrement très sophistiquées de la radio-astronomie. Les fluctuations de température (indiquées par les différences de couleur) de quelques millièmes de degré correspondent aux zones qui deviendront des galaxies.

**Entre 380 000 ans et 200 millions d'années**  
**(après le Big Bang)**

## **Les âges sombres**

L'univers est alors un nuage d'hydrogène et d'hélium en expansion continue.  
La température est de plus en plus basse, aucune lumière n'est émise.

Sous l'effet de la gravitation (tout objet ayant une masse attire et est attiré par tout autre objet massif), le nuage de départ se fragmente peu à peu en « petits » nuages : il fait des « grumeaux » comme dans une sauce béchamel ratée !

Chacun de ces « grumeaux » deviendra une galaxie.

A leur tour, les nuages-galaxie se fragmentent  
en micro-nuages qui deviendront des étoiles.

**Vers 200 millions d'années après le Big Bang, quelques micro-nuages s'effondrent sous l'effet de la gravitation.**

**En se comprimant, la température de ces nuages remonte jusqu'à 15 millions de degrés.**

**Cette température est suffisante pour que se déclenchent des réactions thermonucléaires :**

**les premières  
étoiles sont nées !**



En scannant ce QR Code avec votre portable, vous accédez à une superbe vidéo réalisée par le CEA : Histoire de l'UNIVERS Selon le modèle du Big Bang,

**À déguster sans modération !**

<https://www.youtube.com/watch?v=OVDzf qxUm54>



# 200 millions d'années après le Big Bang, les premières étoiles

Dans ces étoiles, les réactions thermonucléaires transforment l'hydrogène en hélium, avec une forte production d'énergie (c'est ce qui se passe sur Terre lors de l'explosion d'une bombe H).



Première bombe H - 1 novembre 1952  
National Nuclear Security Administration  
Domaine public

C'est cette production d'énergie qui permet à l'étoile d'avoir une forme stable, de résister à l'effondrement gravitationnel (sous l'effet de son propre poids) et de déverser dans l'espace une grande quantité de lumière.

Il y a aussi, au cœur de l'étoile, des réactions nucléaires qui produisent des éléments plus lourds que l'hélium, jusqu'au fer (N° 26).



**Des étoiles se forment encore aujourd'hui :**

**La pépinière d'étoiles LH 95 dans le Grand Nuage de Magellan observée par Hubble le 14 août 2006  
(distance : 150 000 Années Lumière)**

# Premières étoiles et supernovae

Lorsque l'étoile aura consommé tout son hydrogène, son évolution dépendra de sa masse :

Petite étoile (comme notre Soleil), elle passera par une phase d'expansion puis s'effondrera sur elle-même avant de refroidir lentement et de devenir une « naine brune ».

Plus grosse, lors de l'effondrement gravitationnel, la température atteindra 200 000 000 de degrés et, en un très bref instant (l'équivalent de quelques jours terrestres), des réactions nucléaires fabriqueront les éléments de N° supérieur à 26 (le fer) et l'étoile, devenue supernovae, explosera et disséminera la moitié de sa matière dans l'espace.

Ces « poussières d'étoile » se retrouveront ensuite dans des petits nuages de gaz qui ne se sont pas encore effondrés et qui, plus tard, donneront d'autres étoiles avec pour certaines un cortège planétaire.



Restes de la supernova Cassiopeia A.  
NASA/JPL-Caltech/STScI/CXC/SAO

# Les fabriques d'atomes



**Du Carbone au Fer**  
**Au cœur des premières étoiles**  
**Température**  
**15 000 000 degrés**

Les atomes d'hydrogène et d'hélium se sont formés dans les premiers instants de l'Univers.

Les atomes plus gros ont été fabriqués par la suite dans les étoiles (jusqu'au-fer) puis lors des explosions des supernovæes pour les atomes plus lourds.

**Du Fer à l'Uranium**  
**Au cœur des premières**  
**supernovæes**  
**Température**  
**200 000 000 degrés**

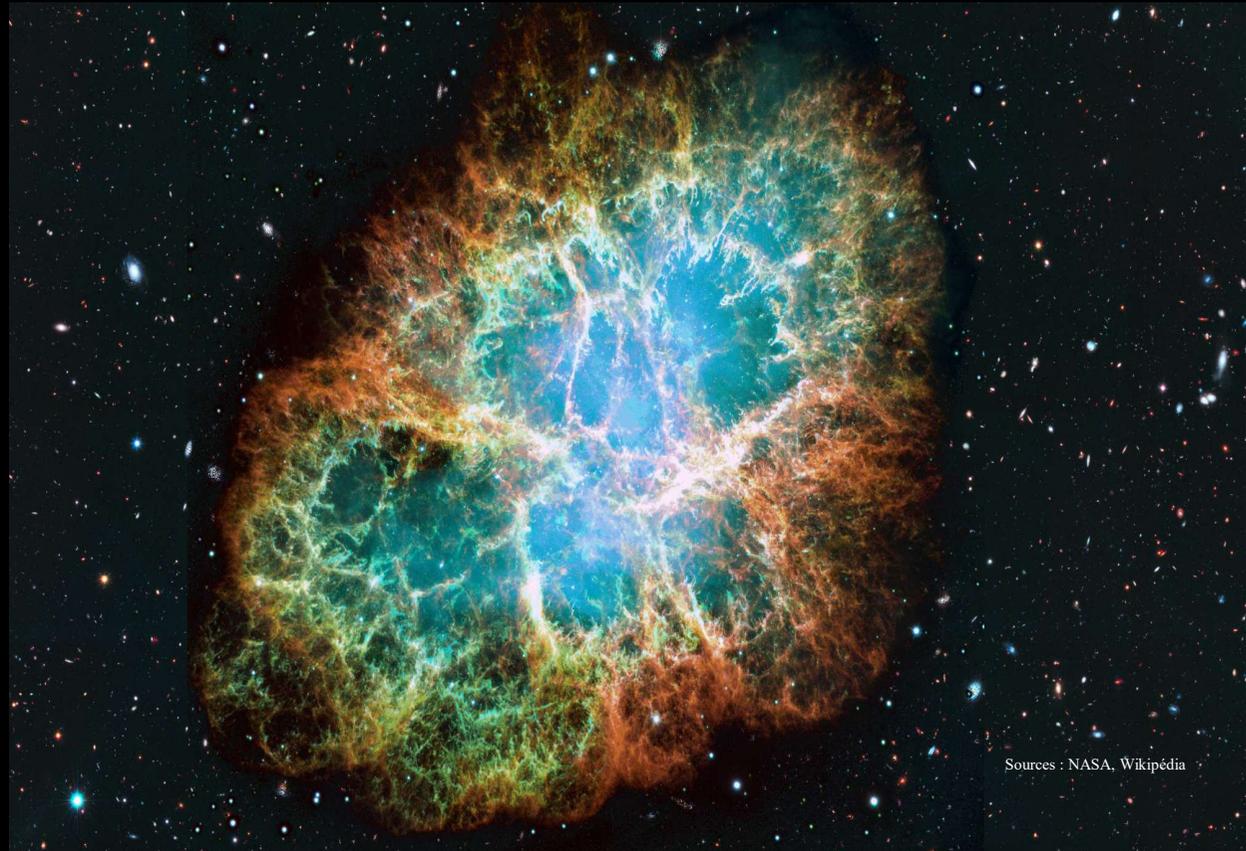


ISXP 1062

CHINESE X-RAY OBSERVATORY

# La nébuleuse du Crabe

**Ce sont les restes d'une supernovae observée par les astronomes chinois en 1054**



Sources : NASA, Wikipédia

**L'analyse des textes historiques a montré que la supernova à l'origine de la nébuleuse du Crabe apparut probablement en avril ou début mai 1054, atteignant une magnitude apparente maximale (c'est-à-dire sa luminosité) comprise entre -5 et -3 en juillet 1054.**

**Elle était alors plus lumineuse que tous les autres objets du ciel nocturne à l'exception de la Lune.**

**L'évènement est noté dans les recueils chinois où l'étoile a été nommée 天關客星 (Tianguan Guest Star, SN 1054).**

**Pendant 23 jours, elle resta suffisamment lumineuse pour être visible en plein jour.**

**Située à environ 6 000 années-lumière de la Terre, elle contient en son centre un pulsar, le pulsar du Crabe (ou PSR B0531+21), reste de l'étoile d'origine, qui tourne sur lui-même environ trente fois par seconde.**

# Classification périodique des éléments

|                      |                       |                      |                            |                      |                         |                           |                       |                          |                          |                          |                          |                       |                        |                        |                          |                         |                        |                    |                   |
|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| 1<br>Hydrogène       |                       |                      |                            |                      |                         |                           |                       |                          |                          |                          |                          |                       |                        |                        |                          |                         | 2<br>Hélium            |                    |                   |
| 3<br>Li<br>Lithium   | 4<br>Be<br>Beryllium  |                      |                            |                      |                         |                           |                       |                          |                          |                          |                          |                       |                        |                        |                          |                         |                        | 9<br>F<br>Fluor    | 10<br>Ne<br>Néon  |
| 11<br>Na<br>Sodium   | 12<br>Mg<br>Magnésium |                      |                            |                      |                         |                           |                       |                          |                          |                          |                          |                       |                        |                        |                          |                         |                        | 17<br>Cl<br>Chlore | 18<br>Ar<br>Argon |
| 19<br>K<br>Potassium | 20<br>Ca<br>Calcium   | 21<br>Sc<br>Scandium | 22<br>Ti<br>Titane         | 23<br>V<br>Vanadium  | 24<br>Cr<br>Chrome      | 25<br>Mn<br>Manganèse     | 26<br>Fe<br>Fer       | 27<br>Co<br>Cobalt       | 28<br>Ni<br>Nickel       | 29<br>Cu<br>Cuivre       | 30<br>Zn<br>Zinc         | 31<br>Ga<br>Gallium   | 32<br>Ge<br>Germanium  | 33<br>As<br>Arsenic    | 34<br>Se<br>Sélénium     | 35<br>Br<br>Brome       | 36<br>Kr<br>Krypton    |                    |                   |
| 37<br>Rb<br>Rubidium | 38<br>Sr<br>Strontium | 39<br>Y<br>Yttrium   | 40<br>Zr<br>Zirconium      | 41<br>Nb<br>Niobium  | 42<br>Mo<br>Molybdène   | 43<br>Tc<br>Technétium    | 44<br>Ru<br>Ruthénium | 45<br>Rh<br>Rhodium      | 46<br>Pd<br>Palladium    | 47<br>Ag<br>Argent       | 48<br>Cd<br>Cadmium      | 49<br>In<br>Indium    | 50<br>Sn<br>Étain      | 51<br>Sb<br>Antimoine  | 52<br>Te<br>Tellure      | 53<br>I<br>Iode         | 54<br>Xe<br>Xénon      |                    |                   |
| 55<br>Cs<br>Césium   | 56<br>Ba<br>Baryum    | 57-71<br>L           | 72<br>Hf<br>Hafnium        | 73<br>Ta<br>Tantale  | 74<br>W<br>Tungstène    | 75<br>Re<br>Rhénium       | 76<br>Os<br>Osmium    | 77<br>Ir<br>Iridium      | 78<br>Pt<br>Platine      | 79<br>Au<br>Or           | 80<br>Hg<br>Mercure      | 81<br>Tl<br>Thallium  | 82<br>Pb<br>Plomb      | 83<br>Bi<br>Bismuth    | 84<br>Po<br>Polonium     | 85<br>At<br>Astate      | 86<br>Rn<br>Radon      |                    |                   |
| 87<br>Fr<br>Francium | 88<br>Ra<br>Radium    | 89-103<br>A          | 104<br>Rf<br>Rutherfordium | 105<br>Ha<br>Hahnium | 106<br>Sg<br>Seaborgium | 107<br>Ns<br>Nielsbohrium | 108<br>Hs<br>Hassium  | 109<br>Mt<br>Meitneirium | 110<br>Ds<br>Darmstatium | 111<br>Rg<br>Roentgenium | 112<br>Cn<br>Copernicium | 113<br>Nh<br>Nihonium | 114<br>Fl<br>Flerovium | 115<br>Mc<br>Moscovium | 116<br>Lv<br>Livermorium | 117<br>Ts<br>Tennessine | 118<br>Og<br>Oganesson |                    |                   |

Fabriqués lors du Big Bang  
Fabriqués par spallation (rayons cosmiques)  
Fabriqués au cœur des étoiles  
Fabriqués lors de l'explosion d'une étoile (supernova)  
Fabriqués par l'homme

Symbole: **Cu** N° atomique: **29**

Elément naturel: **Cuivre** artificiel

Métal Non-métal

L  
Lanthanides

|                      |                    |                        |                     |                        |                      |                      |                        |                     |                        |                     |                    |                     |                       |                      |
|----------------------|--------------------|------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| 57<br>La<br>Lanthane | 58<br>Ce<br>Cérium | 59<br>Pr<br>Praséodyme | 60<br>Nd<br>Néodyme | 61<br>Pm<br>Prométhium | 62<br>Sm<br>Samarium | 63<br>Eu<br>Europium | 64<br>Gd<br>Gadolinium | 65<br>Tb<br>Terbium | 66<br>Dy<br>Dysprosium | 67<br>Ho<br>Holmium | 68<br>Er<br>Erbium | 69<br>Tm<br>Thulium | 70<br>Yb<br>Ytterbium | 71<br>Lu<br>Lutérium |
|----------------------|--------------------|------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|

A  
Actinides

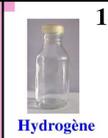
|                      |                     |                         |                    |                       |                       |                       |                    |                       |                         |                         |                      |                          |                       |                         |
|----------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 89<br>Ac<br>Actinium | 90<br>Th<br>Thorium | 91<br>Pa<br>Proactinium | 92<br>U<br>Uranium | 93<br>Np<br>Neptunium | 94<br>Pu<br>Plutonium | 95<br>Am<br>Américium | 96<br>Cm<br>Curium | 97<br>Bk<br>Berkélium | 98<br>Cf<br>Californium | 99<br>Es<br>Einsteinium | 100<br>Fm<br>Fermium | 101<br>Md<br>Mendélévium | 102<br>No<br>Nobélium | 103<br>Lr<br>Lawrencium |
|----------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|

Élément radioactif

Solide Liquide Gaz à la température ordinaire

© 2019  
Projet de loi n° 1043 relatif à la transparence de l'information sur les coûts  
des médicaments, le remboursement des médicaments et la lutte contre les  
fausses factures de médicaments.  
Mars 2019, M. M. ROBERT

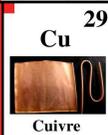
# Origine des éléments : la nucléosynthèse



1 Age de l'univers : 1 seconde - **Nucléosynthèse primordiale**  
Les atomes d'Hydrogène et l'hélium (N° 1 et 2) sont formés (**Température 10 000 000 000 degrés**)



6 Age de l'univers : 100 000 000 années - **La nucléosynthèse stellaire**  
Les premières étoiles apparaissent. Les atomes du carbone au fer (N° 6 à 26) sont formés au cœur des étoiles.  
(**Température interne : 15 000 000 degrés**).



29 Age de l'univers : 200 000 000 années - Les premières supernovas, **la nucléosynthèse explosive**.  
Les atomes du cobalt à l'uranium (N° 27 à 92) sont formés (**Température 200 000 000 degrés**).  
Lors de l'explosion, la moitié de la matière de l'étoile est expulsée dans l'espace.



3 Cas particulier 1 : les atomes de lithium, de béryllium et de bore (N° 3 à 5) ne peuvent avoir été formés durablement par les processus précédents. Plus tard, des particules (des neutrons ou des protons) ou des ondes électromagnétiques de grande énergie (des rayons cosmiques) frappant des noyaux atomiques de N° supérieur à 5 provoquent leur désintégration en noyaux plus petits (N° 3 à 5).  
Ce mécanisme est nommé **la nucléosynthèse interstellaire ou Spallation cosmique**.



98 Cas particulier 2 : Les atomes de N° supérieur à 92 (uranium) se désintègrent spontanément par des réactions de fission nucléaire. Même s'ils ont pu être formés lors de la nucléosynthèse explosive, il n'en reste pas de trace dans la nature, sauf le plutonium et le neptunium (N° 93 et 94). Les autres ont été fabriqués par l'homme (centrales électro-nucléaires, accélérateurs de particules).

Les atomes présents dans notre corps, à part l'hydrogène qui a été formé au tout début de l'univers, viennent d'étoiles ayant explosé avant la formation du système solaire.

Nous sommes donc, suivant la belle expression d'Hubert REEVES, des poussières d'étoiles !

# Les populations d'étoiles

En Astrophysique, on parle de populations d'étoiles suivant leur date de formation et leur métallicité, c'est à dire selon leur richesse en éléments autres que l'hydrogène et l'hélium.

Les plus anciennes, dites de population III dont la métallicité serait nulle ou très très faible. Ces étoiles seraient donc des étoiles nées juste après le Big Bang, à une époque où n'existaient que des atomes d'hydrogène et d'hélium.

La découverte de l'étoile HE 0107-5240, située à 36.000 années lumière dans le halo de la Voie lactée semble valider cette hypothèse. Cette très vieille étoile, entre 13 et 15 milliards d'années, est presque uniquement composée d'hélium et d'hydrogène, les deux éléments principaux de l'univers en formation.

Ces premières étoiles, très massives, auraient été formées d'éléments "légers", essentiellement l'hélium et l'hydrogène. Après une courte vie, ces étoiles auraient explosé, libérant des éléments plus lourds comme le fer, le carbone, l'oxygène ou l'azote qu'elles ont fabriqués durant leur fonctionnement.

C'est à partir de nuages d'hydrogène et d'hélium enrichis de ces éléments que les étoiles des générations suivantes se seraient formées.

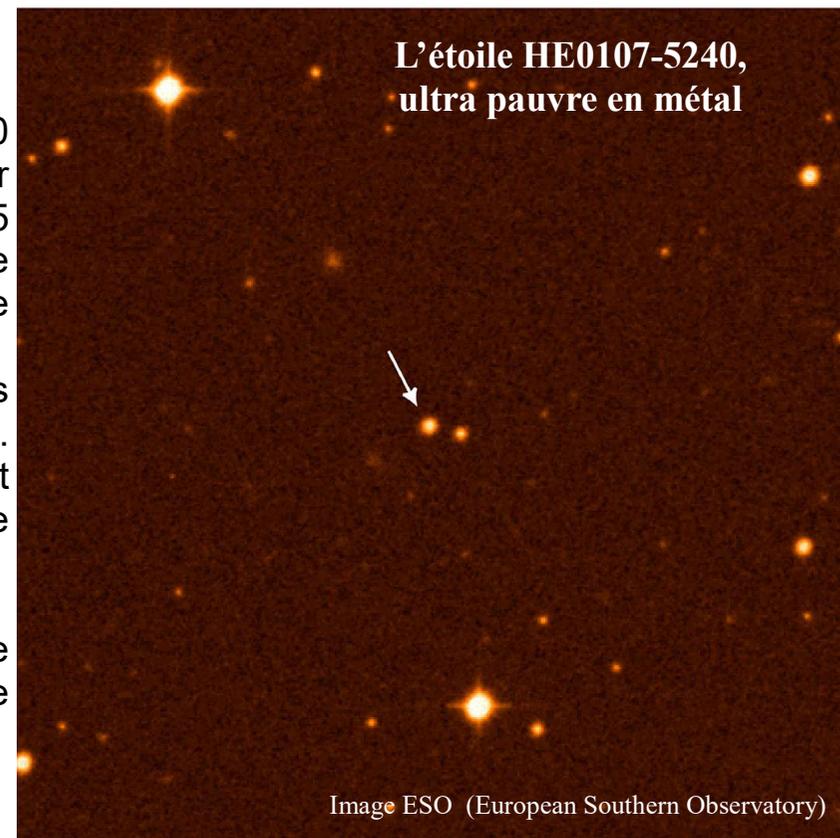
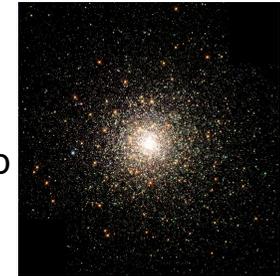


Image ESO (European Southern Observatory)

Les étoiles de population II sont moins pauvres en métaux, mais en contiennent beaucoup moins que, par exemple, notre Soleil. On en trouve beaucoup dans les amas globulaires.

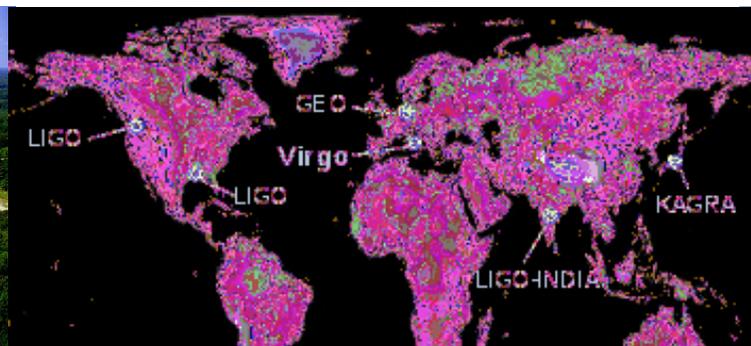


L'amas globulaire M80  
Photo NASA

Les étoiles de population I, sont celles de type solaire, c'est à dire, qui ont été formées à partir de nuages de gaz chargés d'éléments lourds (autres que l'hydrogène et l'hélium) issus d'explosions de supernovae antérieures.

Notre Soleil est de cette population I. On peut penser que des événements cataclysmiques comme la fusion de deux « trous noirs » émettant ce que l'on appelle des ondes gravitationnelles (une onde qui déforme l'espace-temps) ont pu déclencher la contraction du petit nuage de gaz qui deviendra notre système solaire.

Prédites par Albert Einstein, ces ondes ont été détectées pour la première fois en 2015 par les appareils Ligo (États-Unis) et Virgo (Europe).



# Le système solaire

Il y a environ 5 000 000 000 d'années, dans notre morceau d'univers, notre galaxie, un petit nuage de gaz commence à s'effondrer sous l'influence des forces de gravitation.

Il contient un mélange d'hydrogène et d'hélium formés lors du Big Bang et d'autres éléments fabriqués dans les étoiles et supernovas qui ont précédé.

Au centre, la plus grande partie de ce nuage se comprime et s'échauffe jusqu'à 15 000 000 de degrés. Les réactions thermonucléaires s'amorcent.

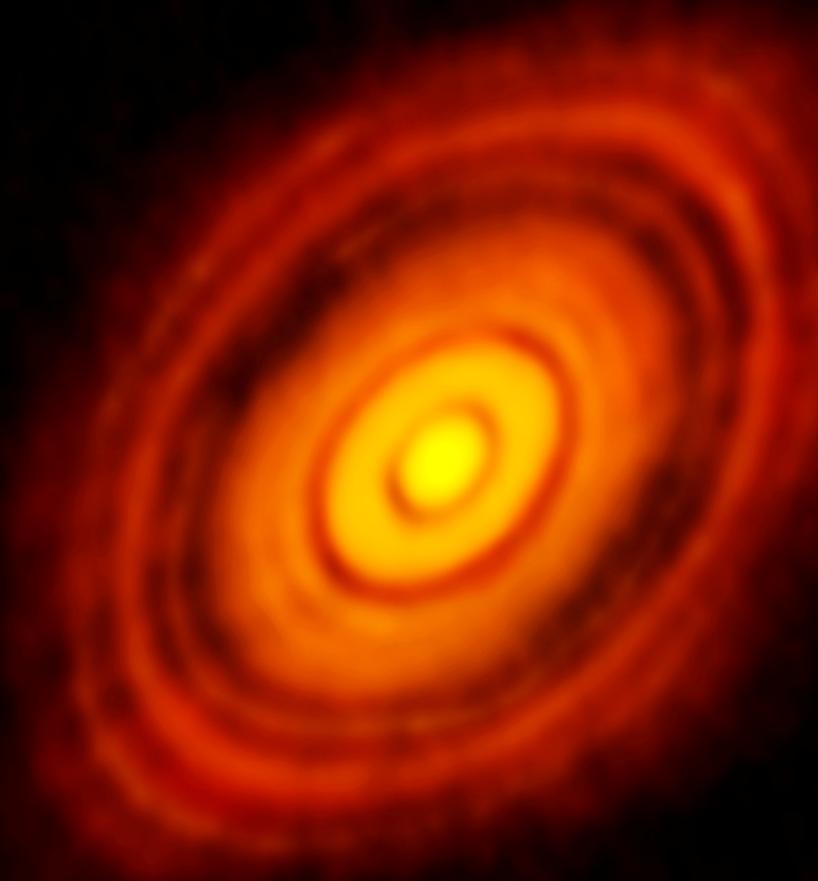
Une étoile, notre étoile, le Soleil, s'allume.

Autour, des petites boules se forment, composées en grande partie des éléments divers expulsés par les supernovas lors de leur explosion : au final, ces boules deviendront les planètes et leurs satellites.



Photo ESO

Disque protoplanétaire de HL Tauri  
(image réalisée par l'*Atacama Large Millimeter Array*).



<http://www.eso.org/public/archives/images/large/eso1436a.jpg>

Aujourd'hui encore, des étoiles naissent avec leur cortège de planètes.

La photographie ci-contre, prise le 6 novembre 2014 par l'observatoire ALMA montre le disque protoplanétaire HL TAURI, situé dans notre galaxie à environ 450 années lumière.

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, en français « grand réseau d'antennes millimétrique/submillimétrique de l'Atacama) est un radiotélescope géant observant les ondes millimétriques installé dans le désert d'Atacama dans le nord du Chili. Il est composé de 66 antennes d'un diamètre compris entre 7 et 12 mètres qui peuvent être écartées de 150 m à 16 km et qui fonctionnent en interférométrie. Pour obtenir les meilleures conditions d'observation, les antennes du radiotélescope sont installées sur le haut plateau de Chajnantor à environ 5 100 m d'altitude près de la ville de San Pedro de Atacama

L'Atacama Large Millimeter Array (ALMA) de nuit, sous les nuages de Magellan  
CC BY 4.0



# Formation de la Lune



Représentation artistique  
de la collision entre deux  
protoplanètes qui a mené  
à la création du système  
Terre/Lune

Photo :  
NASA/JPL-Caltech

Très tôt dans l'histoire du système solaire, une collision se serait produite entre la Terre et un autre objet de la taille de Mars, objet que les chercheurs ont baptisé Théia.

Cet objet, déjà solide, aurait impacté une proto-Terre couverte, quant à elle, d'un océan de magma chaud, comme c'était effectivement le cas quelque 50 millions d'années après la formation du Soleil.

Cette collision aurait entraîné l'éjection d'une énorme quantité de matière qui se serait agglomérée pour donner naissance à la Lune. A l'époque de l'impact, la plus grande partie du fer de la Terre s'était déjà rassemblée dans le noyau. La matière éjectée provenait principalement du manteau, plus pauvre en fer, ce qui explique que la Lune contient une faible proportion de cet élément.

La similarité dans la proportion de différents noyaux atomiques entre la Lune et le manteau terrestre, confirmée après l'analyse des roches lunaires rapportées par les missions Apollo, est due au fait que les deux corps ont une origine commune.

Enfin, la nature très aléatoire d'un impact de cette importance explique pourquoi la Terre est la seule planète interne du système solaire à posséder un satellite de si grande taille qui stabilise l'orientation de l'axe de rotation de la Terre (responsable des saisons).

La Lune présente toujours le même hémisphère à la Terre (sa rotation étant synchrone, c'est-à-dire sa période de révolution étant égale à sa période de rotation). Cette rotation synchrone résulte des frottements qu'ont entraînées les marées causées par la Terre sur la Lune, et qui ont progressivement amené la Lune à ralentir sa rotation sur elle-même, jusqu'à ce que la période de ce mouvement coïncide avec celle de la révolution de la Lune autour de la Terre.

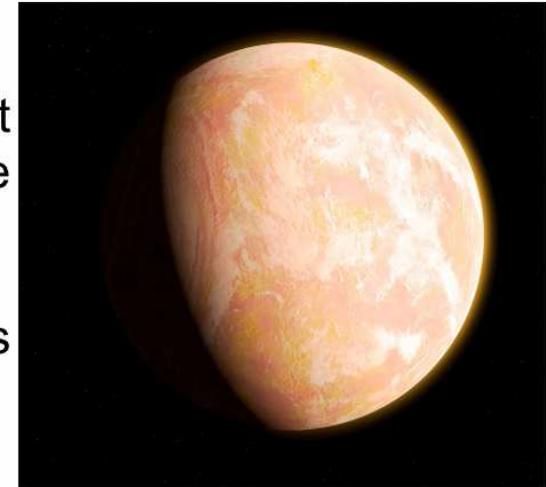
Actuellement les effets de marée de la Lune sur la Terre ralentissent la rotation de cette dernière et provoquent un léger éloignement des deux astres d'environ 3,8 cm par année. Cet éloignement et ce ralentissement font que la durée du jour terrestre augmente de 15  $\mu$ s par an. La Lune à sa naissance orbitait à une distance 2 fois moindre qu'aujourd'hui et la Terre tournait alors sur elle-même en 6 heures.

# Les premiers océans

- 4 400 000 000 ans

Il y a environ 4 400 000 000 ans, la terre est suffisamment refroidie pour que l'eau dégagée par le volcanisme et celle apportée par les météorites se condense et forme les océans.

La pluie ruisselle sur les roches de surface, dissout certains éléments et les emporte dans les océans.



NASA-EarlyEarth-PaleOrangeDot-20190802.jpg



Le volcanisme intense dégage, en plus de l'eau, une grande quantité de dioxyde de carbone (  $\text{CO}_2$  ).

L'atmosphère primitive, composée de gaz très légers (Hydrogène et Hélium) s'échappe dans l'espace et est remplacée par un mélange essentiellement composé de dioxyde de carbone, d'eau et d'azote.

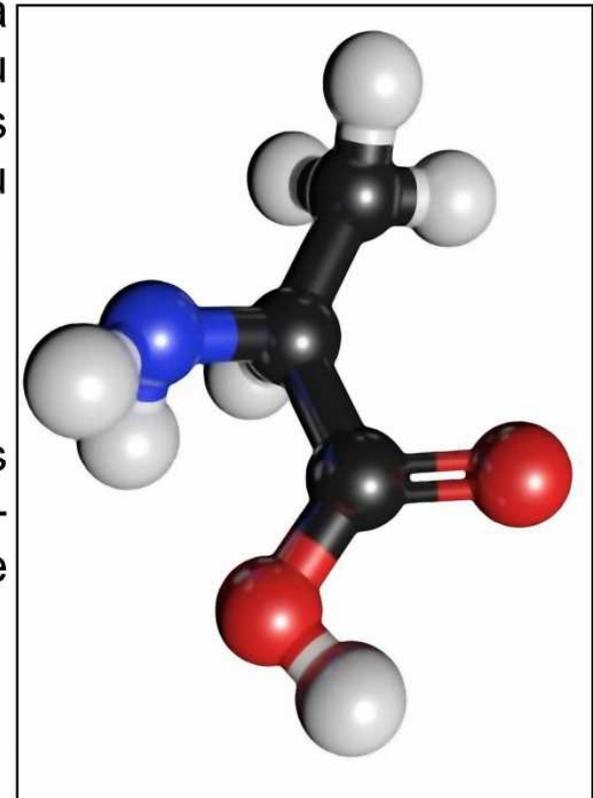
Petit à petit, l'eau s'accumule dans les océans, l'atmosphère est moins nuageuse et la lumière solaire arrive en plus grande quantité au sol.



Grand Bombardement Tardif - Photo NASA/JPL-Caltech/R.Hurt

Au cours du milliard d'années qui va suivre, l'eau des mares, des lacs ou des océans va s'enrichir de molécules et d'ions de plus en plus complexes apportés par le volcanisme, les météorites ou les comètes qui continuent à percuter la Terre ou produits par des réactions chimiques dans l'air ou dans l'eau.

Par exemple, on y trouvera de l'alanine qui sera une des briques carbonées du vivant : l'alanine alias acide 2-aminopropanoïque, l'un des acides aminés (éléments de base constituant les protéines ).



# L'apparition de la vie

**entre - 4 000 000 000 ans et - 3 700 000 000 ans**

La vie apparaît probablement à cette époque, mais beaucoup d'incertitudes demeurent.

« D'une manière ou d'une autre, la vie a finalement pris la forme d'une « cellule », capable de maintenir l'intégrité d'un « individu » par rapport à l'environnement, capable de maintenir un métabolisme cohérent par des échanges chimiques avec le milieu environnant, et capable de se répliquer en produisant d'autres « individus » semblables.

Ces trois fonctions de base sont essentielles à la vie. » (Wikipédia)

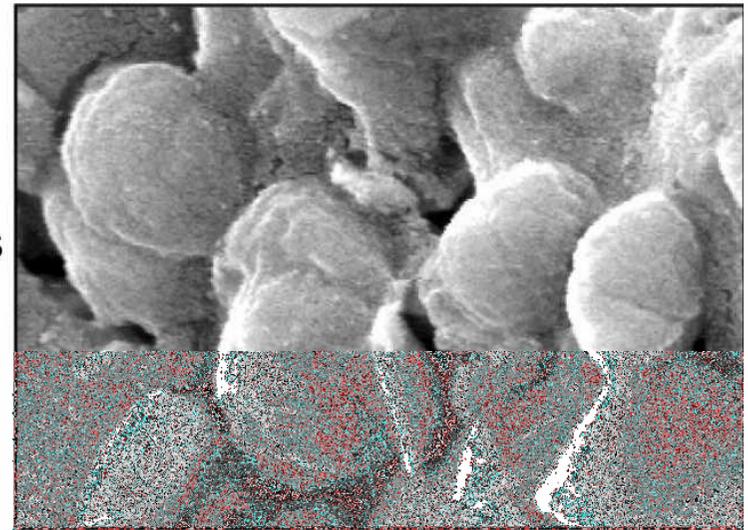


P. Carrara, NPS — National Park Service

Stromatolithes du Précambrien, dans la formation de Siyeh.

En 2002, William Schopf a affirmé que ces formations étaient âgées de 3,5 milliards d'années, elles seraient alors les plus anciennes traces de vie sur Terre

Les plus anciens fossiles de micro-organismes ont été trouvés à Pilbara en Australie. Ils sont vieux de 3,45 milliards d'années. Crédit Frances Westall, CNRS, Orléans.



Une partie du dioxyde de carbone de l'atmosphère est piégé sous forme de calcaire qui se dépose au fond de l'eau.

# La photosynthèse

- 3 000 000 000 ans

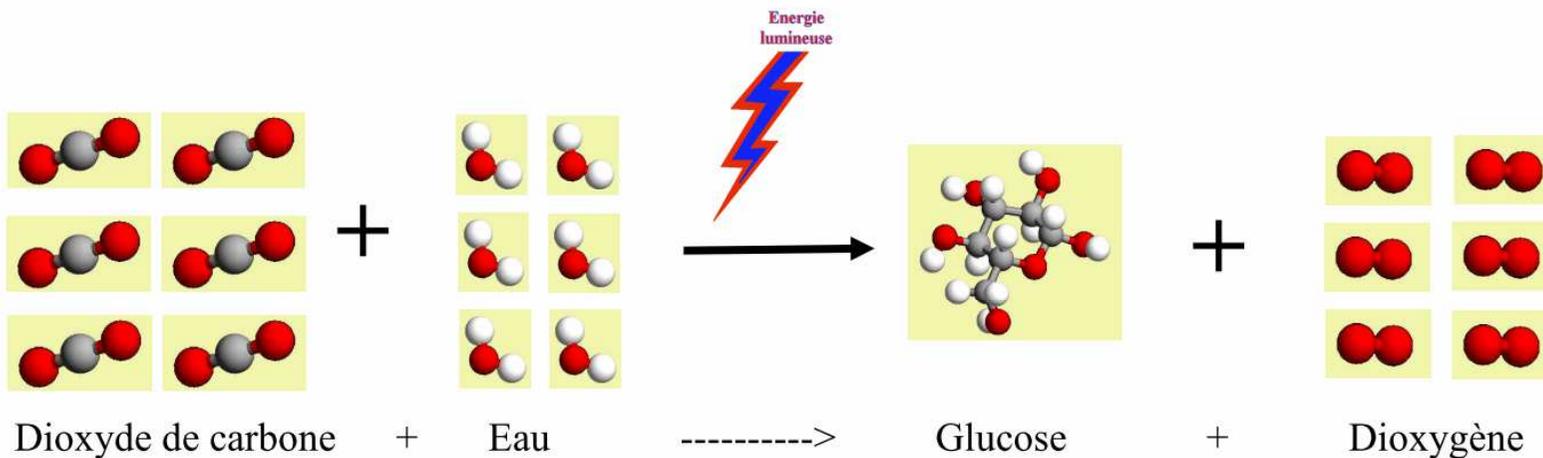


Anabaena spherica  
Patrioter6 at  
en.wikibooks,  
CC BY-SA 3.0

Les formes de vie précédentes ont consommé une grande partie des sources d'énergie présentes dans les océans.

La continuation de la vie impose une diversification :

Au cours de l'évolution apparaissent des organismes capables d'utiliser l'énergie solaire : les cyanobactéries inventent **la photosynthèse**.



Résultat : l'atmosphère s'appauvrit en dioxyde de carbone, l'effet de serre de l'atmosphère diminue, la température baisse et la Terre connaît ses premières glaciations.

Les cyanobactéries comptent parmi les plus anciennes formes de vie en colonie capables de construire des récifs. Les stromatolithes construits par certaines espèces existaient il y a plus de 3,5 milliards d'années. On en trouve encore quelques formations, dont ici dans l'ouest de l'Australie, à Shark Bay.



Photo Luca.gigandet CC BY-SA 4.0

Du dioxygène se dégage. C'est un poison pour les formes de vie existantes. Au début, ce dioxygène réagit avec le fer présent dans l'environnement (ions  $\text{Fe}^{2+}$  provenant de l'altération des roches). Le fer est oxydé à l'état de  $\text{Fe}^{3+}$  par l'oxygène de l'air. Il précipite et reste bloqué dans le sol. La concentration du dioxygène dans l'atmosphère reste faible durant un temps, puis augmente lentement.

Il y a environ 2 700 000 000 ans, les premiers eucariotes (cellules avec noyau) apparaissent. Certains deviennent capables de vivre dans un milieu aérobie (contenant de l'oxygène).

## **La photosynthèse, suite**

**- 2 400 000 000 ans**

Les minéraux sont oxydés et ne peuvent plus fixer le dioxygène qui se répand dans l'atmosphère.

Problème : c'est un poison pour nombre de formes de vie existantes.

De nouvelles formes de vie apparaissent, résistantes au dioxygène, puis d'autres qui, comme nous, vont utiliser le dioxygène.

**- 1 500 000 000 ans**

Les premières algues (d'abord monocellulaires, puis pluricellulaires) apparaissent en milieu aquatique.

L'évolution continue : d'autres organismes apparaissent, qui utilisent les plantes comme source d'énergie : les ancêtres des animaux.

L'évolution invente la reproduction sexuée.

**- 1 000 000 000 ans**

Premiers organismes multicellulaires

**- 700 000 000 ans**

Animaux à corps mou (vers, méduses)



Traces fossiles de terriers de vers marins Presqu-île-de-Crozon



[Domaine public](#) Rhizozoma pulmo.jpg

La teneur de l'atmosphère en dioxygène est proche de la teneur actuelle (21 %).

Formation de la couche d'Ozone O<sub>3</sub> qui filtre les rayons UV

# Invention du squelette

- 540 000 000 ans

Coquilles, carapaces, squelettes apparaissent.



Ammonite - Eduard Solà  
CC BY-SA 3.0



Tortue fossile - Musée d'histoire  
naturelle du Havre



Photo National Park Service  
- Domaine public

A la mort de ces animaux, certains seront fossilisés, et donc conservés dans le temps.

L'étude de ces fossiles nous permet aujourd'hui de décrire et de comprendre les formes de vie pour beaucoup disparues.

# Sortie de l'eau

- 440 000 000 ans

Les algues partent à la conquête des terres, donnant naissance aux premières plantes terrestres

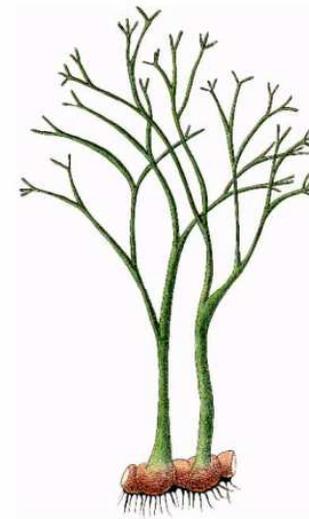
Ces végétaux transforment la roche en sol, modifiant profondément le fonctionnement de notre planète



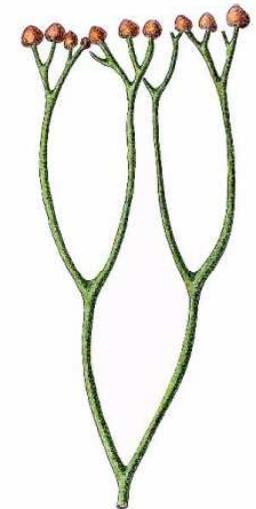
Devonianscene.jpg: Eduard Riou - Domaine public



Prêle - [Walter Siegmund](#)  
CC BY-SA 3.0



Horneophyton lignieri

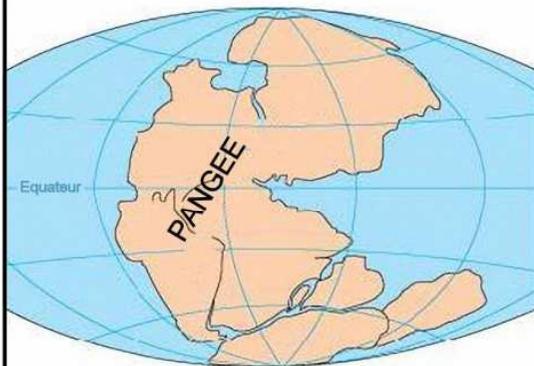


Cooksonia  
caledonica

# L'évolution du monde vivant

Au cours du temps, les plaques continentales dérivent lentement (quelques centimètres par an).

Ces illustrations montrent les positions à différentes époques.

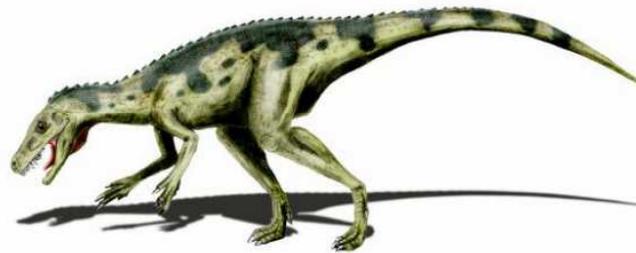


- 225 000 000 ans  
PERMIEN

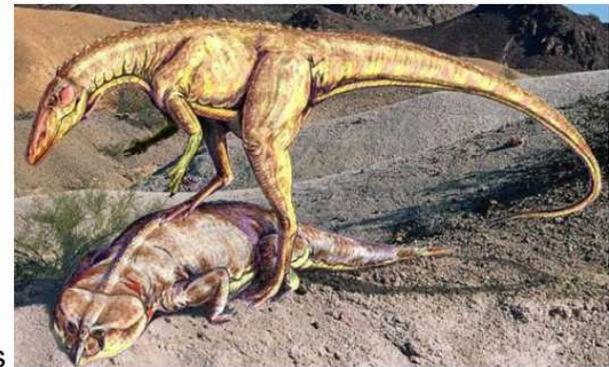
Le plus ancien reptile connu est **Hylonomus lyelli**. C'est également le premier animal connu à s'être adapté complètement à une vie terrestre. L'**Hylonomus** vécut il y a environ 315 millions d'années durant la période que nous appelons le Carbonifère tardif. Il mesurait 20 centimètres et il devait être insectivore.



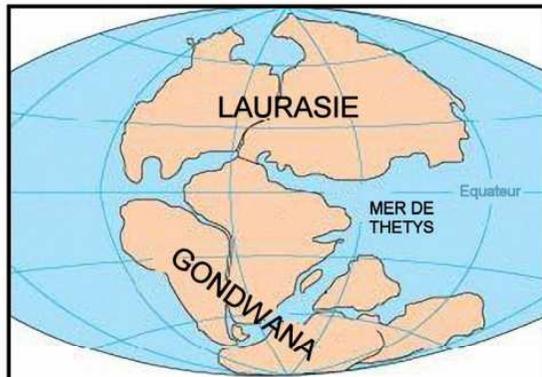
- 230 000 000 ans - Les dinosaures



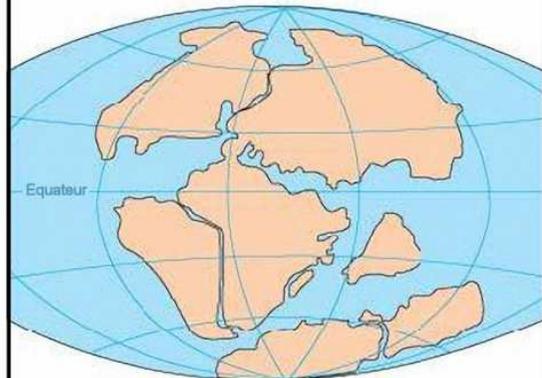
Une reconstitution d'Herrerasaurus, l'un des plus anciens dinosaures connus, vers -230 millions d'années au trias supérieur (vue d'artiste par Nobu Tamura). CC BY 2.5



[Domaine public](#) Staurikosaurus dévorant un Rhynchosaurus, par le paléoartiste Dimitri Bogdanov.

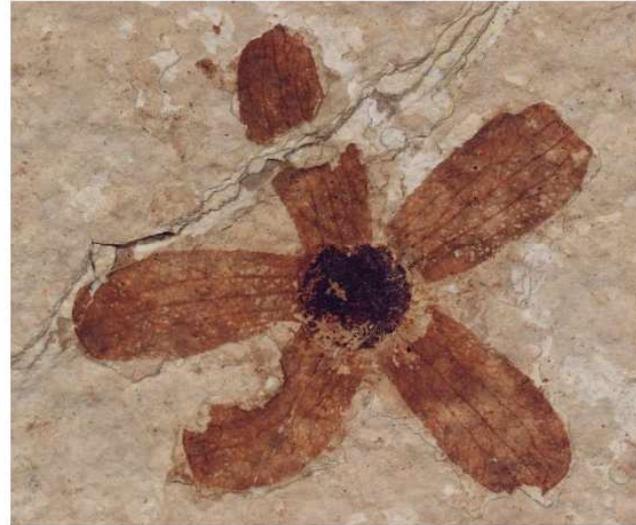


**- 200 000 000 ans**  
**TRIAS**



**- 155 000 000 ans**  
**JURASSIQUE**

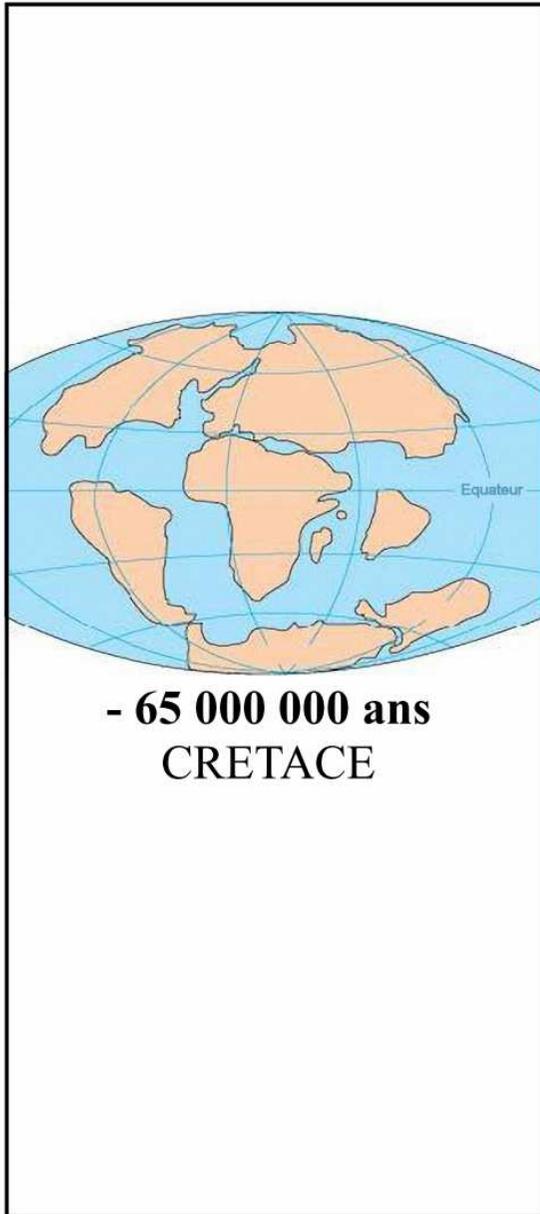
**- 200 000 000 ans - Les plantes à fleur**



**- 150 000 000 ans - Les oiseaux**



Un fossile de Gansus, au musée d'histoire naturelle de Pékin. Ce genre est considéré aujourd'hui comme le plus ancien de la famille des oiseaux.



**- 66 000 000 ans**  
**Extinction Crétacé-Paléogène**  
Disparition des dinosaures, des ammonites et de beaucoup d'autres espèces.



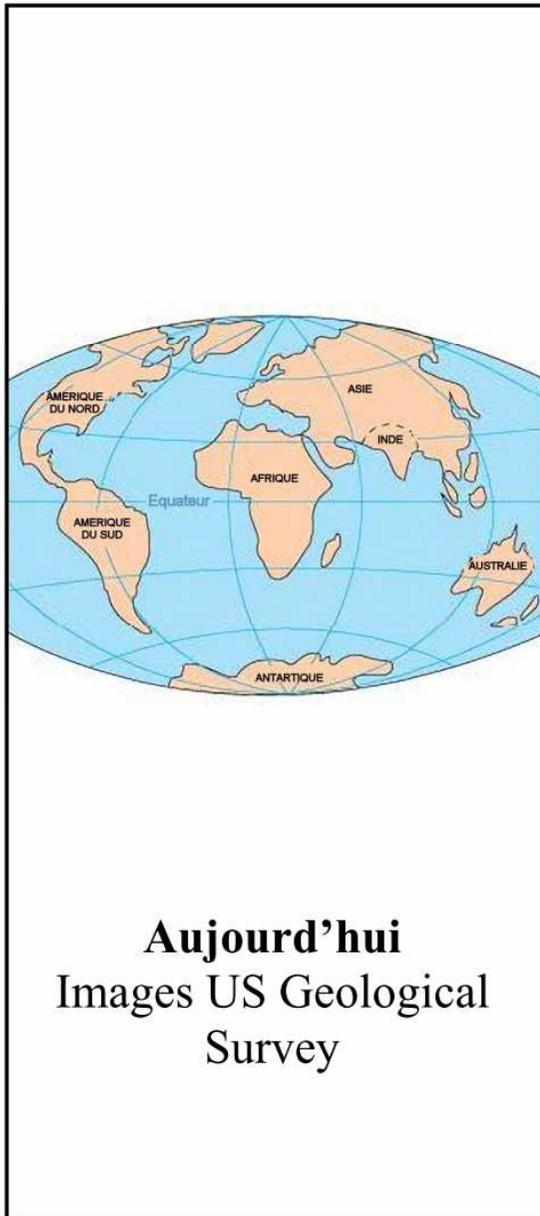
Ammonite fossile

Eduard Solà — Travail personnel CC BY-SA 3.0

**Apparition des premiers mammifères**

**- 40 000 000 ans**  
**Les graminées**





**- 20 000 000 ans**

Les homminidés, ancêtres des hommes et des grands  
singes

**- 7 000 000 ans**

Toumaï - Invention de la bipédie



Moulage du crâne de  
Toumaï, 7 millions d'années.  
Exemplaire du Laboratoire  
d'Anthropologie Moléculaire  
et Imagerie de Synthèse de  
Toulouse. CC BY-SA 4.0

**- 2 000 000 ans**

Homo habilis



Homo habilis trouvé en 1968  
dans les gorges d'Olduvaï, en  
Tanzanie, daté de 1,8 millions  
d'années.

Nachosan — Travail personnel  
CC BY-SA 3.0

La suite de l'évolution humaine : homme de néanderthal, homo sapiens, vous et moi...

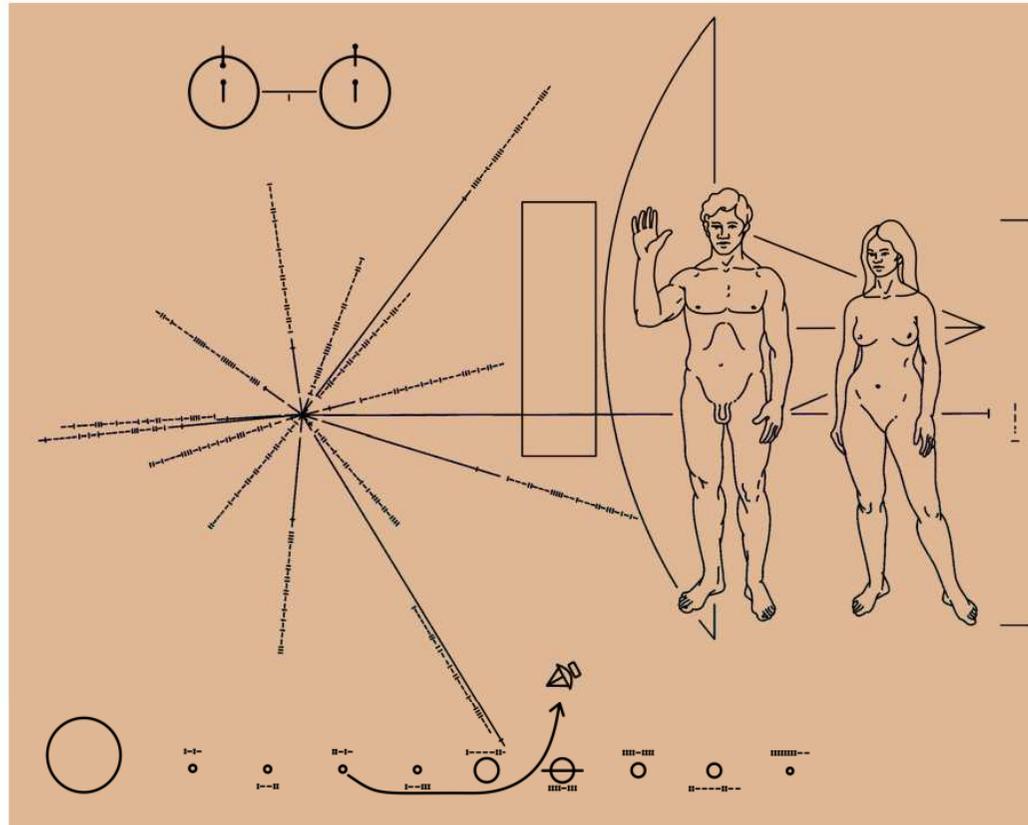


Image de la plaque attachée à la sonde Pioneer 10 lancée en 1972.  
Image créée par la NASA.





NASA/ESA Hubble Space Telescope