

# Une histoire du Big-Bang à l'Homme



*Réalisation André Leblé*

# Sommaire

<b>Introduction</b>		<b>Des vertébrés aux reptiles</b>	27
La démarche scientifique	1	<b>Des reptiles aux primates</b>	29
Une histoire en trois volets	2	<b>L'évolution</b>	
Quelques dates	2	Histoire	31
<b>Origine de l'univers</b>		Mécanismes	31
Constitution de l'univers	3	Les grandes extinctions	32
Univers en expansion	4	Réflexions	32
Détermination de l'âge de l'univers	4	<b>Des primates aux grands singes</b>	
Un scénario du Big-Bang	4	Évolution des primates	33
<b>Naissance, vie et mort d'une étoile</b>		Les grands singes	34
Naissance	7	<b>Des grands singes à l'homme</b>	
Vie	7	Avertissement	35
Mort	7	Appellations et divergences des grands	
<b>Le milieu interstellaire</b>	11	singes	35
<b>Formation du système solaire et de la Terre</b>		La lignée humaine	36
Le soleil	15	<b>La bipédie</b>	39
Le système solaire	15	<b>Les outils</b>	40
La Terre	16	<b>Les sorties d'Afrique</b>	
<b>Apparition de la vie sur Terre</b>		Première sortie	41
Préambule	17	Homo sapiens	42
L'évolution chimique	17	Deuxième sortie	42
Des molécules organiques aux bactéries	19	<b>Autres questions</b>	43
Les plus vieux fossiles	20	<b>Sommes-nous seuls dans l'univers</b>	
<b>Évolution des bactéries</b>	21	Chimie interstellaire	44
<b>La fin du précambrien</b>		Planètes et satellites du système solaire	44
Géochronologie	23	Exoplanètes	44
Évolution des protozoaires	23	<b>Conclusion</b>	46
<b>L'explosion cambrienne</b>	25		

# Introduction

## La démarche scientifique

L'homme est apparemment le seul être vivant sur Terre à posséder une pensée consciente qui lui permet de se poser des questions sur ce qu'il observe. Pendant très longtemps, ces questions ont dû se limiter à ce qui était vital pour la survie de l'individu ou du groupe auquel il appartenait. Par la suite, l'homme fit appel à l'intervention de divinités plus ou moins nombreuses, généralement dotées d'intentions et de sentiments humains, afin de donner une sorte de cohérence logique aux différents phénomènes (astronomiques, météorologiques, relations humaines...) qu'il pouvait observer.

A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, la démarche scientifique moderne commence à prendre forme, basée sur des observations précises, des expériences reproductibles, et sur une logique rigoureuse permettant d'établir des relations mathématiques entre les différentes grandeurs mesurées. Le premier grand succès de cette démarche est la théorie de la gravitation universelle et de la mécanique classique développée par Newton. Cependant, cette théorie ne nous fournit pas des certitudes absolues. Elle nous permet seulement de décrire avec une certaine précision les mouvements des objets dans des cas très particuliers. Par exemple, elle ne sait pas déterminer le mouvement de plus de deux objets en interaction gravitationnelle (encore aujourd'hui, personne ne sait le faire) et elle devient défaillante quand la vitesse des objets n'est plus négligeable par rapport à la vitesse de la lumière (dans ce cas, la théorie de la relativité d'Einstein prend le relais).

De façon générale, les grandes théories actuelles de la physique que sont l'électromagnétisme, la thermodynamique, la relativité générale, la mécanique quantique, et toutes les théories dérivées ne permettent jamais d'obtenir des certitudes absolues, mais, dans le meilleur des cas, elles permettent de rendre compte avec une précision plus ou moins satisfaisante de toutes les observations effectuées et de prédire, toujours avec une certaine précision, le résultat d'expériences futures. De plus, la mécanique quantique qui est, par nature, probabiliste, ne permet pas de prédire le résultat d'une expérience, mais seulement la probabilité d'obtenir un résultat donné.

Dans les sciences plus « molles » comme la biologie par exemple, les certitudes sont encore plus rares ou plus floues et, bien que cette science connaisse actuellement une expansion considérable, elle ne fournit pas, comme la physique, des théories à prétention globale.

Quand on passe à la paléontologie qui est, par essence, une science historique, le niveau de certitude diminue encore considérablement car les sources d'information sont souvent peu nombreuses ou parcellaires. On ne peut plus vraiment dans ce cas échafauder des théories comme en physique. On parle pourtant (à tort) de la théorie de l'évolution alors qu'il s'agit tout au plus d'un scénario permettant de relier de façon aussi logique et vraisemblable que possible les observations faites sur les fossiles.

Dans tous les cas, le scientifique est amené à construire des théories, des modèles, des scénarios qu'il soumet à l'épreuve de l'expérimentation ou de l'observation. Tant que les résultats obtenus sont en accord avec les prévisions de la théorie, on considère que celle-ci est, provisoirement, valable.

## Une histoire en trois volets

Il serait très prétentieux de prétendre expliquer en quelques pages l'histoire qui s'est déroulée du Big-Bang à l'homme alors que des dizaines d'ouvrages très complets et très savants ont déjà été consacrés à ce sujet. Les lignes qui suivent ont donc simplement pour objet d'aider le lecteur à fixer tout au long de cette histoire quelques points qui me paraissent essentiels, tant au niveau des connaissances du moment que de la fiabilité de ces connaissances.

Le premier volet de ce document est essentiellement astronomique et concerne l'origine de l'univers, la formation des étoiles, la synthèse des éléments atomiques. Il se termine par la formation du système solaire et de la terre.

La seconde partie traite de la chimie et de la biochimie qui ont conduit à l'apparition de la vie sur Terre.

Enfin, nous ferons le bilan des connaissances actuelles concernant l'évolution de la vie sur terre en suivant le chemin qui a conduit des premières bactéries jusqu'à l'homme.

## Quelques dates

Toute « histoire » peut difficilement s'affranchir de dates qui, si elles ne sont pas toujours essentielles, sont cependant des points de repères utiles. En voici quelques unes, sans commentaires.

- **13,8 milliards d'années** : « création » de l'univers.
- **4,6 milliards d'années** : formation du système solaire et de la terre.
- **environ 4 milliards d'années** : apparition de la vie sur terre.
- **66 millions d'années** : disparition des grands reptiles.
- **environ 7 millions d'années** : isolement de la lignée humaine.

# Origine de l'univers

## Constitution de l'univers

L'unité de base de notre univers est l'étoile. Elle peut être entourée de planètes.

Les étoiles sont regroupées en galaxies.

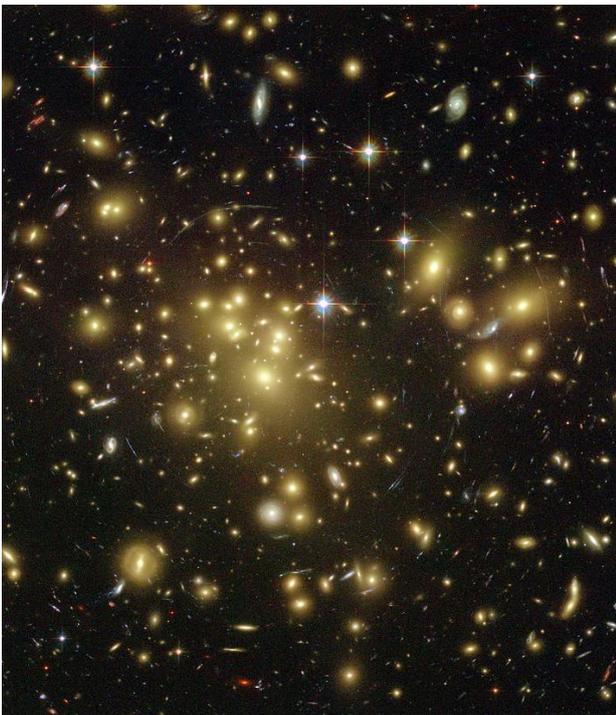
Notre Galaxie est un disque aplati de 90 000 années-lumière de diamètre.

Il contient quelques centaines de milliards d'étoiles.



Galaxie d'Andromède,  
voisine de notre Galaxie

Jusqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle, l'univers vu par l'observateur terrestre se limitait à notre Galaxie. C'est seulement dans les années 1920 que Hubble observa dans la constellation d'Andromède une nébuleuse (photo ci-dessus) dans laquelle il put distinguer de nombreuses étoiles et qu'il reconnut comme étant une autre galaxie. L'observation de l'espace avec des télescopes de plus en plus puissants a permis de découvrir un très grand nombre de galaxies. Celles-ci sont presque toujours groupées en amas. Ci-dessous un gros amas et un petit.



Amas Abell 1689



Quintette de Stephan

Les amas sont regroupés en super-amas. Les formes des amas sont quelconques alors que les super-amas se répartissent le long de filaments ou dans des structures en forme de crêpes séparées par des grandes bulles vides.

## Univers en expansion

L'observation de l'univers montre que celui-ci est en expansion, c'est-à-dire que toutes les galaxies s'éloignent les unes des autres. L'astronome américain Hubble a été le premier à mesurer la distance et la vitesse des galaxies à partir de 1923.

Dans le cadre de la relativité générale élaborée par Einstein entre 1907 et 1915, le russe Alexandre Friedmann (1924) et le belge Georges Lemaître (1927) proposent, de façon indépendante, un modèle mathématique d'univers en expansion.

Cette idée a eu beaucoup de mal à s'imposer dans la communauté scientifique de l'époque, en grande partie car Einstein était partisan d'un univers stationnaire. Le nom de Big-Bang fut inventé par dérision en 1949 par Fred Hoyle, célèbre astronome américain, opposé à cette théorie.

L'idée d'un univers en expansion n'a été admise définitivement que dans les années 1960 après l'observation du rayonnement fossile de l'univers.

*Cette expansion est établie à partir d'observations, de mesures fiables et de théories solides.*

## Détermination de l'âge de l'univers

L'âge de l'univers peut être déterminé de plusieurs manières plus ou moins précises : l'âge des plus vieux atomes radioactifs, l'observation des amas globulaires d'étoiles, la mesure de la vitesse d'expansion de l'univers (par le télescope spatial Hubble), l'observation du rayonnement fossile de l'univers (satellite Planck).

Les deux dernières sont les plus précises et sont basées sur des phénomènes différents. Elles fournissent toutes les deux un âge d'environ **13,8 milliards d'années**, ce qui confère à cette valeur une fiabilité que n'aurait pas celle fournie par un seul type de mesure.

## Un scénario du Big-Bang

L'observation de l'expansion de l'univers conduit à l'hypothèse du Big-Bang et cette hypothèse permet d'imaginer, en tenant compte des connaissances de la science contemporaine, un scénario dont les grandes lignes sont exposées ci-dessous. Nous signalerons quelques preuves qui viennent appuyer la justesse de cette histoire.

### *La première seconde*

Les connaissances actuelles en physique de l'infiniment petit permettent de commencer notre histoire à l'instant  $t = 10^{-43}$  s après la « naissance » de l'univers. Son diamètre est alors de  $10^{-5}$  m (10  $\mu$ m) et sa température est de  $10^{32}$  K. Il est formé de paires de particules-antiparticules virtuelles qui sont nées des fluctuations quantiques de l'énergie du vide.

A l'instant  $t = 10^{-32}$  s l'univers commence une phase d'expansion très brutale et rapide appelée inflation. Cette phase, nécessaire pour expliquer certaines observations, n'est pas encore très bien comprise. L'univers est alors formé de quarks, d'électrons, de neutrinos et de photons ainsi que de leurs antiparticules.

A l'instant  $t = 1$   $\mu$ s, la température est descendue à  $10^{12}$  K. Les quarks et les antiquarks se réunissent par trois pour former des protons, des neutrons, des antiprotons et des antineutrons.

A l'instant  $t = 100$   $\mu$ s, une première grande extinction a lieu : les photons qui sont produits lors de la rencontre d'un proton et d'un antiproton ou d'un neutron et d'un antineutron ont une énergie insuffisante pour recréer une paire particule-antiparticule. Or, les théories actuelles permettent de montrer que, lors des fluctuations quantiques du vide qui sont, théoriquement, à l'origine de la naissance de l'univers, quand 1 milliard d'antiparticules sont produites, il y a apparition de 1 milliard + 1

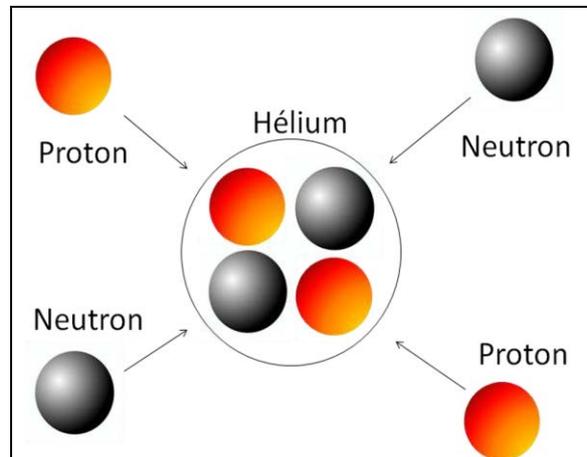
particules. Après cette première grande extinction, il y a donc dans l'univers un milliard de photons pour une particule de matière. L'observation confirme cette proportion.

A la **fin de la première seconde** de l'univers, une deuxième extinction se produit entre les électrons et les positrons (électrons positifs). A cet instant, l'univers est donc constitué de protons, de neutrons, d'électrons, de photons et de neutrinos. La température est de 10 milliards de degrés.

### *Les noyaux et les atomes*

Pendant les **3 premières minutes**, des protons et des neutrons s'unissent pour former des noyaux d'hélium mais cette réaction s'arrête à la fin de la troisième minute.

En effet, à ce moment, la température n'est plus que de 15 millions de degrés et les protons (qui se repoussent à cause de leur charge électrique) n'ont plus assez d'énergie pour se rapprocher suffisamment et s'unir sous l'action des forces nucléaires.



Les protons qui restent sont des particules stables. Les neutrons libres se transforment en protons au bout d'un temps moyen de 10 minutes.

L'univers est donc alors constitué de noyaux d'hydrogène (protons), de noyaux d'hélium, d'électrons, de photons et de neutrinos. Les calculs permettent de déterminer les proportions d'hydrogène et d'hélium : 12 protons pour 1 noyau d'hélium. Les observations de l'univers actuel confirment ces proportions.

### *Transparence de l'univers*

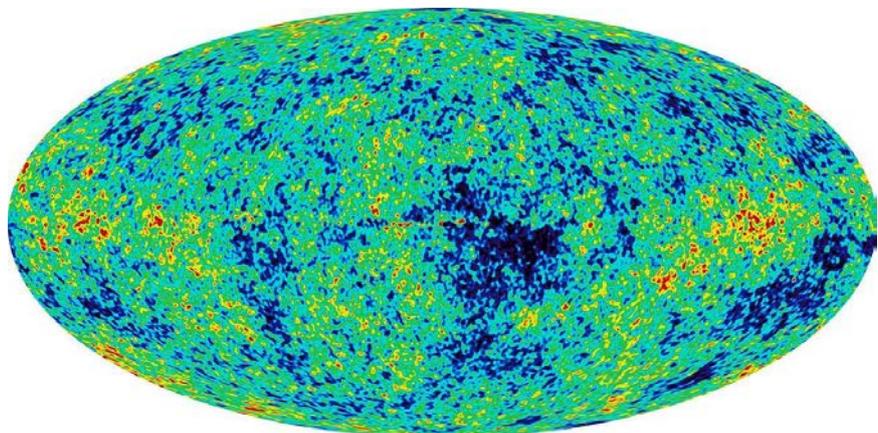
Pendant **380 000 ans**, l'univers continue de se refroidir sans subir de modifications particulières. Il est lumineux mais opaque car les photons percutent en permanence les électrons qui se mettent en orbite autour des protons ou des noyaux d'hélium et détruisent les atomes en formation.

Quand la température n'est plus que de 3000 K, les photons n'ont plus une énergie suffisante pour empêcher les électrons de se lier aux noyaux et de former ainsi des atomes d'hydrogène et d'hélium. L'univers devient alors transparent aux photons qui se propagent sans obstacle majeur.

Ceux-ci ont été observés pour la première fois en 1965 par Penzias et Wilson. Ils constituent ce que l'on appelle le rayonnement fossile de l'univers. Celui-ci avait été prévu en 1946 par Gamov qui se basait sur les travaux antérieurs de Friedman et Lemaître.

Le satellite Planck chargé d'observer dans le détail ce rayonnement fossile a été lancé en 2009.

La collecte des données a duré jusqu'en 2012 et la carte du ciel représentant les irrégularités du rayonnement fossile a été publiée en 2015.



La température actuelle de ces photons n'est plus que de 2,7 K. L'observation de ce rayonnement a mis un terme aux querelles qui opposaient à l'époque les tenants des différents modèles d'univers (dont Einstein qui était partisan d'un modèle stationnaire avec création continue de matière).

Les atomes de l'univers forment alors d'immenses nuages de matière qui, sous l'effet des forces de gravitation vont se fractionner et donner naissance aux étoiles, regroupées dans des galaxies, elles-mêmes rassemblées en amas et en super-amas.

### *Conclusion*

Les observations qui permettent d'étayer sérieusement le scénario du big-bang qui vient d'être exposé sont donc :

- L'expansion de l'univers
- La proportion particules/photons
- La proportion Hydrogène/Hélium
- Le rayonnement fossile à 2,7 K

Mais, en 2019, toutes les observations sont loin d'être expliquées par ce scénario.

Le mouvement de rotation des galaxies sur elle-même n'est pas cohérent avec la masse estimée de ces galaxies. On doit alors faire l'hypothèse de l'existence d'une **matière noire** dont la nature n'est pas encore expliquée.

De même, des mesures précises de la vitesse d'expansion de l'univers montrent que celle-ci est en augmentation. Pour expliquer ce phénomène, on fait l'hypothèse de l'existence d'une **énergie noire** (une sorte d'antigravitation) encore très mystérieuse.

Comme il a été dit en introduction, la science fournit des explications provisoires du monde. Des expériences en cours tentent d'observer la matière noire à partir de nouvelles théories de physique des particules. De même que de nouvelles théories de la gravitation tentent d'expliquer l'énergie noire.

Enfin, il n'existe pas encore de théorie de gravitation quantique qui permettrait de mieux comprendre ou expliquer ce qui a pu se passer aux tous premiers instants de l'univers.

# Naissance, vie et mort d'une étoile

## Naissance

Sous l'effet des forces de gravitation, un nuage formé d'atomes d'hydrogène et d'hélium, et dont les dimensions sont de l'ordre de quelques années lumière, se contracte. Lors de cette contraction, l'énergie de gravitation se transforme en chaleur et la température du nuage augmente donc progressivement.

Quand elle atteint 3000 K, les atomes perdent leurs électrons et le nuage devient un plasma de protons, de noyaux d'hélium et d'électrons. Quand la température au centre du nuage atteint environ 15 millions de degrés, les protons ont alors une énergie suffisante pour vaincre les forces de répulsion électriques et permettre aux forces nucléaires d'agir. Il y a donc allumage des réactions thermonucléaires et un équilibre s'établit entre les forces de gravitation qui tendent à contracter l'étoile et l'énergie dégagée par les réactions nucléaires qui tend à la faire exploser. L'étoile commence à briller.

## Vie

Les réactions nucléaires qui se produisent au cœur de l'étoile commencent donc par transformer l'hydrogène en hélium.

Quand l'hydrogène commence à manquer, la gravitation reprend le dessus et provoque une nouvelle contraction de l'étoile qui s'accompagne d'une augmentation de la température. Quand elle atteint 100 millions de degrés, l'hélium devient un combustible nucléaire et sa fusion produit du carbone et de l'oxygène. Ces réactions nucléaires sont très énergétiques et elles font gonfler l'étoile qui devient une géante rouge.

Quand à son tour l'hélium s'épuise, une nouvelle contraction augmente la température jusqu'à 1000 millions de degrés et de nouvelles réactions nucléaires conduisent à la synthèse d'éléments atomiques de plus en plus lourds.

## Mort

La grosseur d'une étoile conditionne sa durée de la vie et la façon dont elle va mourir. En effet, plus une étoile est petite et plus elle va vivre longtemps. Le soleil qui est une étoile assez petite doit vivre 10 milliards d'années. Les étoiles les plus grosses ne vivent que quelques millions d'années.

### *Petites étoiles*

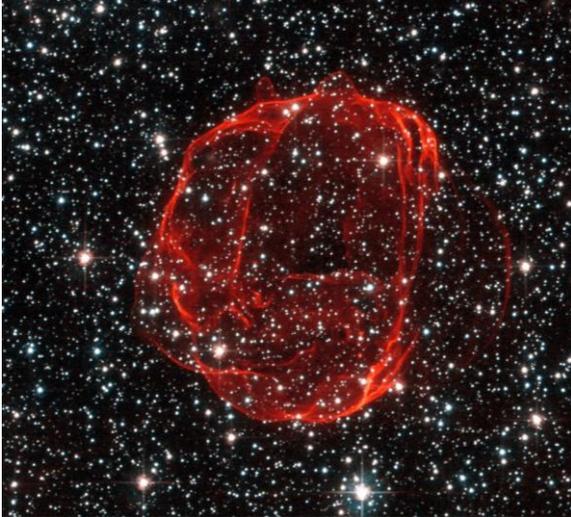
Après être passées par une phase de géante rouge, les étoiles de moins de 1,4 masses solaires terminent leur vie paisiblement par épuisement du combustible nucléaire et, sous l'effet de la gravitation, elles deviennent des naines blanches qui brillent de plus en plus faiblement, entourées par un halo formé des couches externes perdues par la géante rouge.

La naine blanche est à peine visible au centre de la Nébuleuse de l'hélice

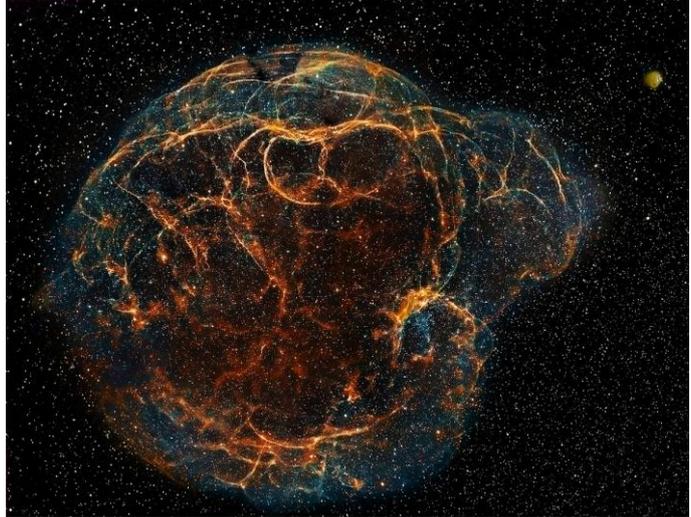


### Grosses étoiles

Les grosses étoiles ont une vie et une mort plus compliquées. Lors de la combustion de l'hélium, l'étoile devient également une géante rouge mais la contraction suivante et les nouvelles réactions nucléaires qui se déclenchent vont provoquer une explosion. L'étoile devient une super nova et elle disperse dans l'espace tous les éléments fabriqués pendant sa vie. Si l'étoile est de taille moyenne (entre 1,4 et 5 masses solaires), il subsistera à sa place une étoile à neutron appelée également pulsar. Si l'étoile est très grosse (plus de 5 masses solaires), le résidu sera un trou noir qui est une concentration de matière tellement dense que les forces de gravitation empêchent la lumière émise de s'échapper dans l'espace.



SNR0519



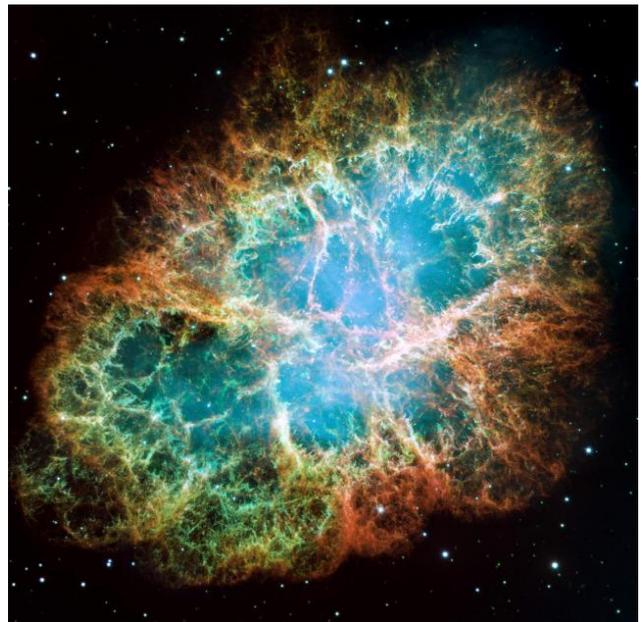
Simeis 147

Les trous noirs ne peuvent pas être observés directement puisque la lumière qu'ils émettent ne peut pas nous parvenir, *mais leur existence ne fait aucun doute*. Les binaires X sont des systèmes formés d'une étoile en rotation autour d'un trou noir. La première observation de ces objets date de 1994 (GRS1915+105). On pense également que le centre des galaxies abrite un trou noir géant. Le centre de notre Galaxie (SgrA\*) fait l'objet d'intenses observations. Depuis 2015, les instruments Ligo et Virgo ont observé plusieurs fois des ondes gravitationnelles produites par des événements astronomiques violents (fusion de deux trous noirs par exemple).

A l'échelle humaine, les explosions de super nova dans notre environnement proche sont rares puisqu'il s'en produit en moyenne une par siècle.

Le premier témoignage d'une telle observation est donné par les Chinois en 1054.

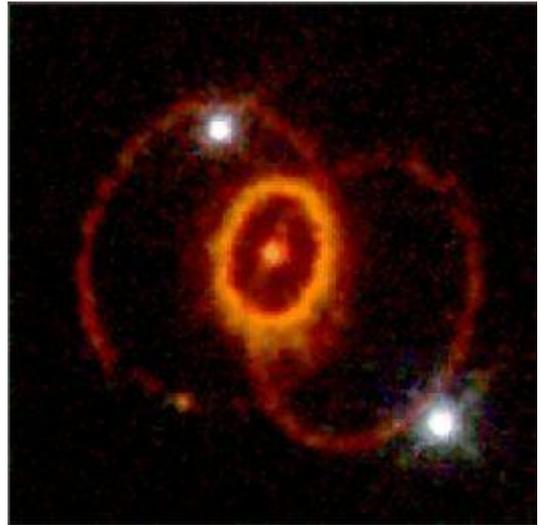
Les restes de cette étoile forment la nébuleuse du Crabe.



L'astronome danois, Tycho Brahé, en décrit une en 1572. Accessoirement, les observations précises de cet astronome ont contribué à l'émergence de l'héliocentrisme.

Plus récemment, en 1987, une supernova a explosé dans le nuage de Magellan qui est une galaxie proche de la nôtre (170 000 années lumière). Elle a pu être étudiée dans le détail par tous les observatoires de l'hémisphère austral.

Pour le plaisir des yeux, plusieurs nébuleuses planétaires qui, d'un point de vue esthétique, sont parmi les plus beaux objets observables. Mais attention, ce sont très souvent des images en fausse couleur reconstituées après observation dans plusieurs longueurs d'onde.



PN Hb 12



Necklace



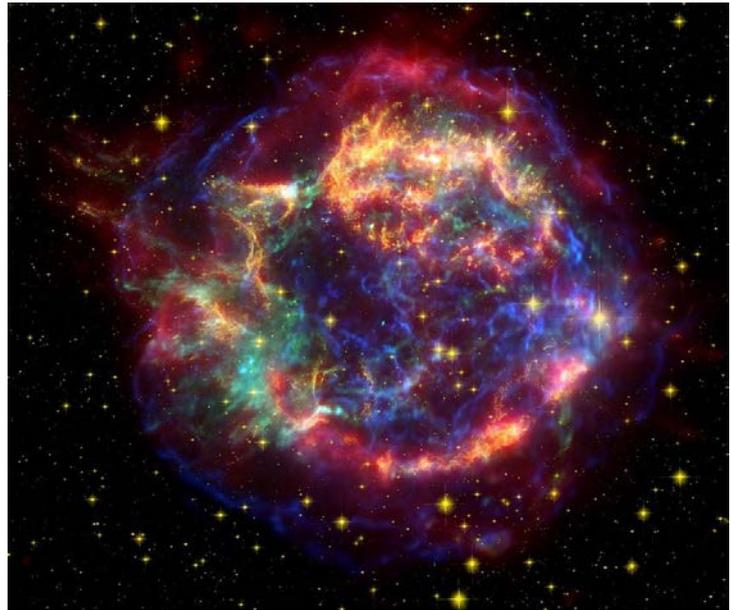
NGC 6543



SNR 0509-67.5



IC 4593



Cassiopee A

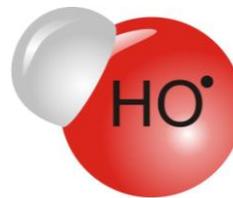
# Le milieu interstellaire

Dans une galaxie actuelle, âgée de 13 milliards d'années environ, le milieu interstellaire contient essentiellement des atomes d'hydrogène et d'hélium, mais aussi, en petite quantité, des atomes plus lourds (oxygène, carbone, azote, métaux, etc...) qui ont été formés dans les étoiles et qui ont été dispersés lors de leur explosion en super nova. L'hydrogène et l'hélium sont très majoritaires avec 99,8 % des atomes. Dans les éléments restants, l'oxygène et le carbone sont les plus abondants et représentent 83% des atomes.

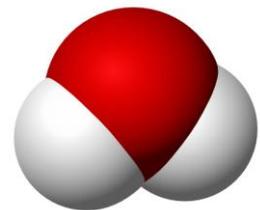
Selon leur température, ces atomes sont observés grâce à leurs raies d'émission ou d'absorption (quand ils sont chauds, au voisinage d'une étoile) ou par radioastronomie quand ils sont froids. Le plus abondant, l'hydrogène, est détecté par la raie Lyman  $\alpha$  (ultra-violet) dans le premier cas et par la raie de 21 cm de longueur d'onde dans le second.

Selon des réactions chimiques plus ou moins spontanées ou complexes, ces atomes se regroupent pour former des molécules.

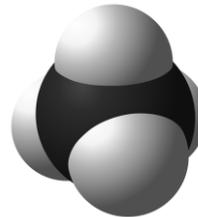
L'hélium n'ayant pas d'activité chimique, les molécules qui vont se former en priorité sont l'hydrogène moléculaire ( $H_2$ ), le radical hydroxyle, l'eau, et de nombreux composés contenant uniquement du carbone et de l'hydrogène (méthane et acétylène par exemple).



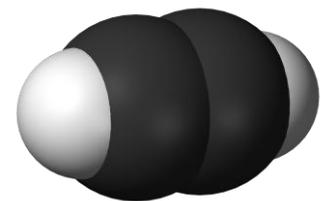
Hydroxyle :  $OH^\cdot$



Eau :  $H_2O$

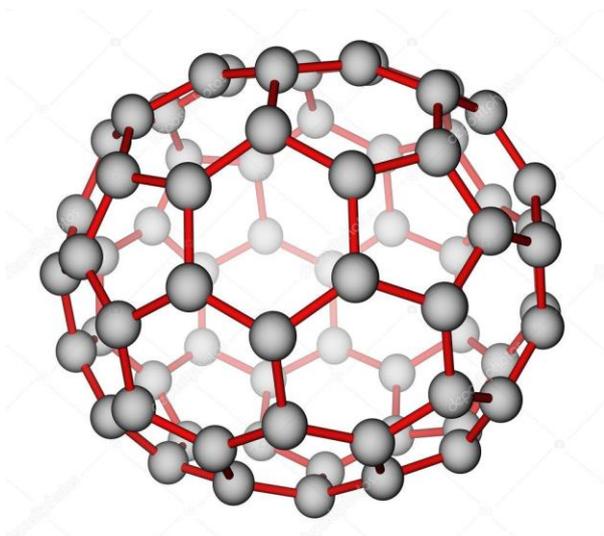


Méthane :  $CH_4$

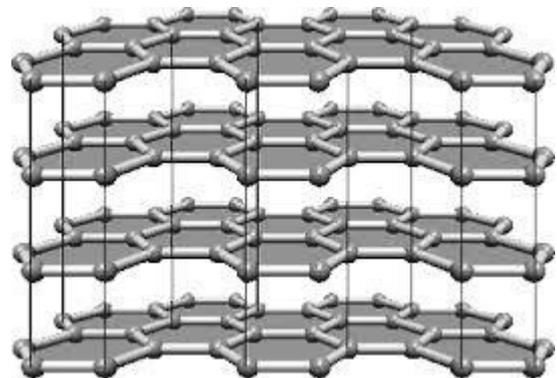


Acétylène :  $C_2H_2$

Les atomes de carbone peuvent s'assembler pour former des fullerènes (molécules en forme de ballon). Ils peuvent également s'assembler en particules de graphite.



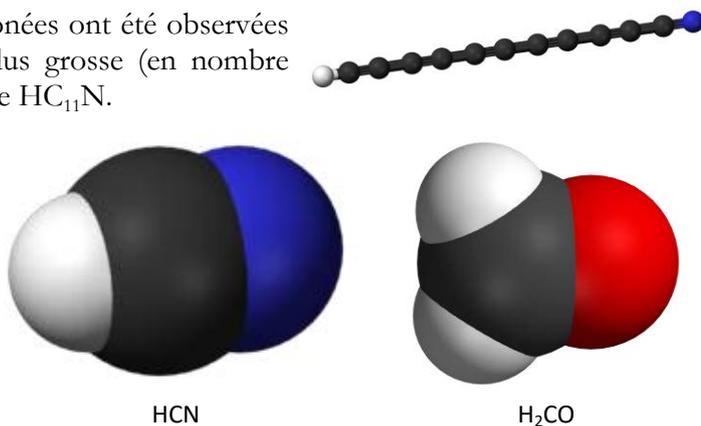
En 2010, la plus grosse molécule observée dans l'espace est le fullerène 70, composé de 70 atomes de carbone.



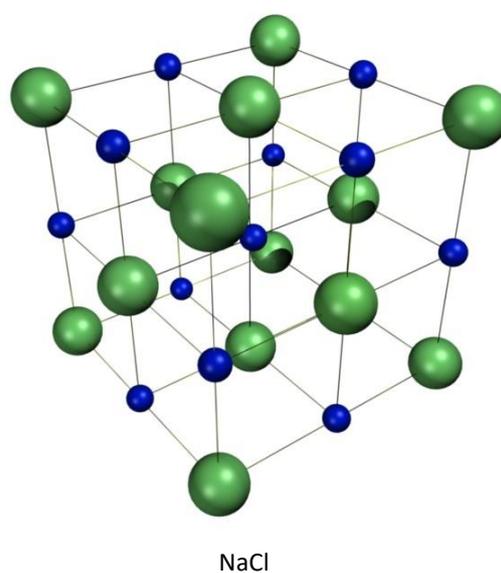
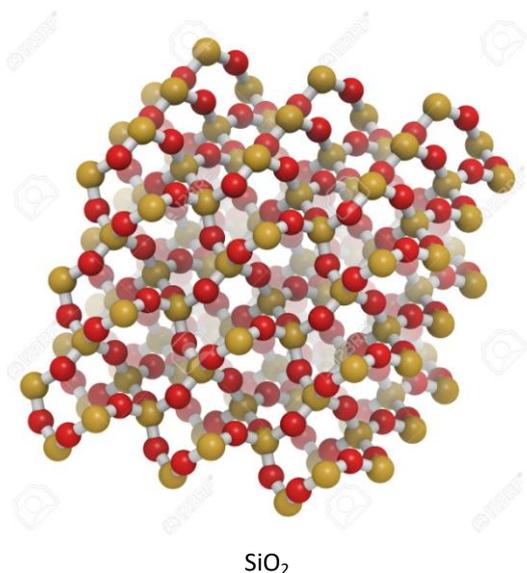
Structure du graphite.

De nombreuses molécules hydrocarbonées ont été observées dans l'espace (plus de 150 à ce jour). La plus grosse (en nombre d'atomes) est le cyanodécapentayne de formule  $\text{HC}_{11}\text{N}$ .

On notera également l'observation de molécules plus simples mais qui joueront probablement un rôle dans l'apparition de la vie sur terre comme l'oxyde de carbone ( $\text{CO}$ ), le cyanure d'hydrogène ( $\text{HCN}$ ) ou le formaldéhyde ( $\text{H}_2\text{CO}$ ).

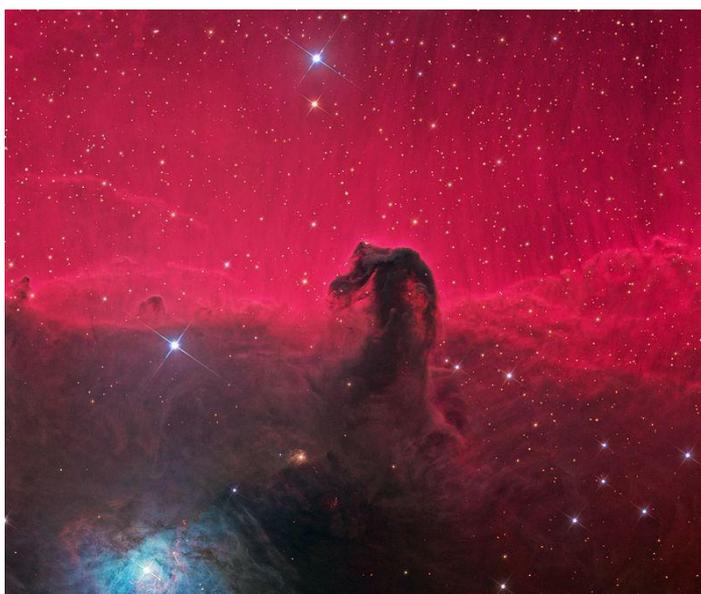


Certains atomes (plus rares) peuvent gagner ou perdre facilement des électrons. Sous l'effet des forces électriques, ils vont se rassembler pour former des oxydes métalliques ( $\text{AlO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ...) et des sels minéraux ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{AlF}$ ,  $\text{NaI}$ ...). Ces composés ont une tendance naturelle à former des cristaux.



On observe dans l'espace des poussières dont la taille est très variable : entre une dizaine de nanomètres (une centaine d'atomes) et quelques dizaines de micromètres. Elles sont constituées des cristaux minéraux ci-dessus ou de particules carbonées.

Les molécules organiques et les molécules d'eau se déposent sur les poussières pour former à leur surface une pellicule glacée. Sous l'action du rayonnement ultraviolet d'étoiles proches, des réactions chimiques peuvent se produire et conduire à la synthèse de molécules hydrocarbonées encore plus complexes.



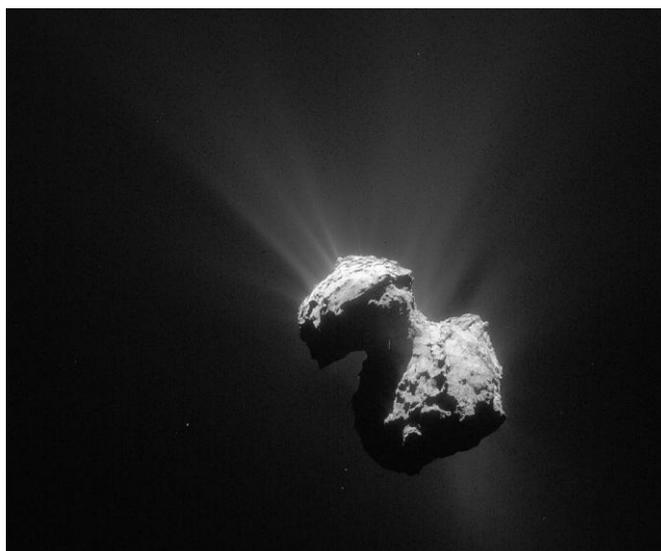
La tête de cheval est un nuage de gaz et de poussières situé dans la nébuleuse d'Orion.

Les observations les plus directes de la matière interstellaire proviennent de l'analyse de météorites tombées sur terre et des satellites envoyés en 1986 pour étudier la queue de la comète de Halley.

La mission la plus récente et la plus spectaculaire commence en 2004 avec l'expédition du satellite Rosetta en direction de la comète « Tchouri ». Après un voyage de plus de 10 ans, le satellite arrive à destination. Le 12 novembre 2014, l'atterrisseur Philae est largué sur « Tchouri ».

Les analyses effectuées sur la comète et celles faites par Rosetta sur des poussières éjectées de la comète confirment l'existence de matière organique abondante et très variée.

« Tchouri » photographié par Rosetta.



Pour information, voilà la liste des molécules ou ions interstellaires observées en 2018 (plus de 200). Elle est sans grand intérêt mais elle montre la grande variété de produits formés et la richesse en molécules organiques.

### Espèces diatomiques

AlCl	CN, CN <sup>+</sup> , CN <sup>-</sup>	HF	NaCl	SO, SO <sup>+</sup>
AlF	CO, CO <sup>+</sup>	HO <sup>•</sup>	MgH <sup>+</sup>	SiC
AlO	CP	KCl	NaI	SiN
ArH <sup>+</sup>	CS	HN	O <sub>2</sub>	SiO
C <sub>2</sub>	FeO	N <sub>2</sub>	PN	SiS
CH, CH <sup>+</sup>	H <sub>2</sub>	NO, NO <sup>+</sup>	PO	TiO
CF <sup>+</sup>	HCl	NS	SH, SH <sup>+</sup>	HeH <sup>+</sup> <sup>1</sup>

### Espèces triatomiques

AlNC	FeCN	HNC	MgCN	<i>c</i> -SiC <sub>2</sub>
AlOH	H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	HCO, HCO <sup>+</sup>	MgNC	SiCSi
C <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> C	HCP	NH <sub>2</sub>	SiCN
C <sub>2</sub> H	H <sub>2</sub> Cl <sup>+</sup>	HCS <sup>+</sup>	N <sub>2</sub> O	SiNC
CCN	H <sub>2</sub> O	HNC	NaCN	TiO <sub>2</sub>
C <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	HN <sub>2</sub> <sup>+</sup>	NaOH	
C <sub>2</sub> S	HO <sub>2</sub>	HNO	OCS	
C <sub>2</sub> P	H <sub>2</sub> S	HOC <sup>+</sup>	O <sub>3</sub>	
CO <sub>2</sub>	HCN	KCN	SO <sub>2</sub>	

### Espèces à quatre atomes

CH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> S	H <sub>2</sub> CS	HCNO	HOOH
<i>l</i> -C <sub>3</sub> H	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	HCCN	HOCN	NH <sub>3</sub>
<i>c</i> -C <sub>3</sub> H	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	HCCO	HNCO	SiC <sub>3</sub>
C <sub>3</sub> N	H <sub>2</sub> CN, H <sub>2</sub> CN <sup>+</sup>	HCNH <sup>+</sup>	HNCS	HMgNC
C <sub>3</sub> O	H <sub>2</sub> CO	HOCO <sup>+</sup>	HSCN	

<sup>1</sup> Observé seulement en 2019, cet ion est un précurseur de la formation de l'hydrogène moléculaire.

### Espèces à cinq atomes

$\text{NH}_4^+$	$\text{C}_3\text{H}_2$	$\text{HNCNH}$	$\text{HCC-NC}$	$\text{SiC}_4$
$\text{CH}_4$	$\text{H}_2\text{CCN}$	$\text{H}_2\text{COH}^+$	$\text{HCOOH}$	$\text{SiH}_4$
$\text{H}_3\text{CO}^+$	$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}$	$\text{C}_4\text{H}, \text{C}_4\text{H}^-$	$\text{NCCNH}^+$	
$\text{C}_3\text{H}_2$	$\text{H}_2\text{CNH}$	$\text{HC}_3\text{N}$	$\text{HC(O)CN}$	

### Espèces à six atomes

$\text{C}_2\text{H}_3\text{O}$	$\text{CH}_3\text{NC}$	$\text{HC}_3\text{NH}^+$	$\text{HC}_2\text{CHO}$
$\text{HNCHCN}$	$\text{CH}_3\text{OH}$	$\text{HCONH}_2$	$\text{HC}_4\text{N}$
$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{CH}_3\text{SH}$	$\text{C}_5\text{H}$	$\text{CH}_2\text{CNH}$
$\text{CH}_3\text{CN}$	$\text{C}_4\text{H}_2$	$\text{C}_5\text{N}$	$\text{C}_5\text{S}$

### Espèces à sept atomes

$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	$\text{H}_3\text{CNH}_2$	$\text{H}_2\text{CHCOH}$	$\text{HC}_4\text{CN}$	$\text{H}_3\text{CNCO}$
$\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}$	$\text{CH}_2\text{CHCN}$	$\text{C}_6\text{H}, \text{C}_6\text{H}^-$	$\text{CH}_3\text{CHO}$	

### Espèces à huit atomes

$\text{H}_3\text{CC}_2\text{CN}$	$\text{CH}_3\text{COOH}$	$\text{CH}_2\text{CCHCN}$	$\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$
$\text{H}_2\text{COHCHO}$	$\text{H}_2\text{C}_6$	$\text{CH}_3\text{CHNH}$	$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$
$\text{HCOOCH}_3$	$\text{CH}_2\text{CHCHO}$	$\text{C}_7\text{H}$	

### Espèces à neuf atomes

$\text{CH}_3\text{C}_4\text{H}$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	$\text{HC}_7\text{N}$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{SH}$
$\text{CH}_3\text{OCH}_3$	$\text{CH}_3\text{CONH}_2$	$\text{C}_8\text{H}, \text{C}_8\text{H}^-$	$\text{CH}_3\text{CHCH}_2$	

### Espèces à dix atomes ou plus

$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	$\text{CH}_3\text{C}_3\text{N}$	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OCHO}$	$\text{C}_6\text{H}_6$	$\text{HC}_{10}\text{CN}$
$(\text{CH}_2\text{OH})_2$	$\text{CH}_3\text{CHCH}_2\text{O}$	$\text{CH}_3\text{COOCH}_3$	$\text{C}_3\text{H}_7\text{CN}$	$\text{C}_{60}$
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHO}$	$\text{HC}_8\text{CN}$	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}$	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCN}$	$\text{C}_{70}$

### Espèces contenant du deutérium

$\text{HD}, \text{H}_2\text{D}^+, \text{HD}_2^+$	$\text{CDO}$	$\text{NH}_2\text{D}, \text{NHD}_2, \text{ND}_3$	$\text{NH}_3\text{D}^+$
$\text{HDO}, \text{D}_2\text{O}$	$\text{DNC}$	$\text{HDCO}, \text{D}_2\text{CO}$	$\text{NH}_2\text{CDO}, \text{NHDCHO}$
$\text{DCN}$	$\text{N}_2\text{D}^+$	$\text{DNCO}$	$\text{CH}_2\text{DCCH}, \text{CH}_3\text{CCD}$

### Espèces chimiques dont l'observation astronomique attend confirmation

$\text{SiH}$	$\text{NCCP}$	$\text{SiH}_3\text{CN}$	$\text{CO}(\text{CH}_2\text{OH})_2$	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$
$\text{PH}_3$	$\text{C}_5$	$\text{HOOC-CH}_2\text{-NH}_2$	$\text{C}_{10}\text{H}_8^+$	$\text{C}_{16}\text{H}_{10}$
$\text{MgCCH}$	$\text{H}_2\text{NCO}^+$	$\text{CH}_3\text{OC}_2\text{H}_5$	$\text{C}_{24}$	

# Formation du système solaire et de la Terre

## Le soleil

Le soleil est une étoile plutôt ordinaire, de petite dimension et dont la formation s'est effectuée par contraction gravitationnelle d'un nuage contenant essentiellement de l'hydrogène (74 % de sa masse) et de l'hélium (25 %), mais aussi des éléments lourds (1 %) rassemblés en poussières et en molécules (voir pages précédentes).

Lors de sa contraction, le nuage se met en rotation et prend la forme d'une sphère entourée d'un disque de gaz et de poussières.

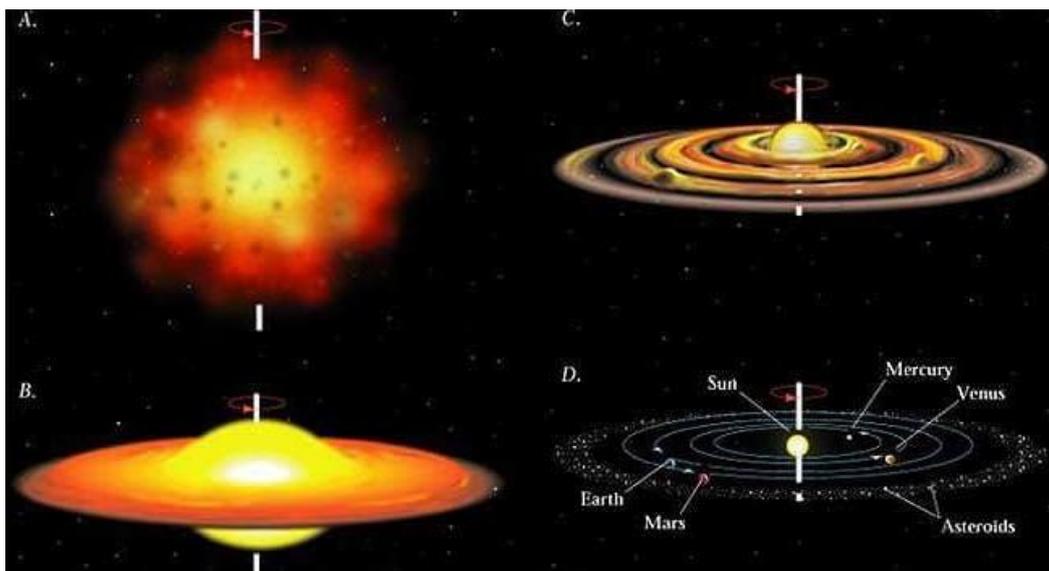
Quand la température au centre atteint 15 millions de K, les réactions thermonucléaires se déclenchent.

La contraction du nuage proto-solaire a commencé il y a environ 4,7 milliards d'années et le soleil s'est « allumé » environ 10 millions d'années plus tard.

Disque circumstellaire  
HD 18137. L'étoile  
centrale est masquée



## Le système solaire



Le schéma ci-dessus illustre quatre étapes de la formation du système solaire.

A : contraction gravitationnelle du nuage initial,

B : mise en rotation avec allumage du soleil,

C : fractionnement de l'anneau de poussières,

D : formation des planètes.

## La Terre

La Terre est une des 8 planètes qui gravitent autour du soleil. Elle s'est formée par accréation, sous l'effet de la gravitation, à partir des poussières situées dans le disque qui entoure le soleil.

Ces poussières sont constituées d'oxydes métalliques, de sels minéraux, et sont recouvertes de molécules glacées. Elles se rassemblent progressivement pour constituer des objets de plus en plus gros gravitant autour du soleil.

Au bout de quelques millions d'années, la taille de ces objets a pu atteindre plus de 1000 km. La formation des planètes a duré environ 100 millions d'années.

La Terre aujourd'hui.



La date de naissance de la Terre peut être fixée à environ **4,6 milliards d'années**. Les dates plus précises que l'on trouve dans la littérature n'ont pas beaucoup de sens puisque la formation du soleil, du système solaire et de la Terre est un processus continu.

La structure de notre planète est alors celle que nous connaissons maintenant avec un noyau métallique de fer et de nickel et un manteau à base de silicates.

L'atmosphère externe primitive est par contre très différente de celle qui existe aujourd'hui. Elle provient de la fusion puis de l'évaporation de la pellicule glacée déposée à la surface des poussières interstellaires.

Bien que la proportion des différents constituants soit loin de faire consensus dans la communauté scientifique, on s'accorde sur la nature de ceux-ci : hydrogène ( $H_2$ ), hélium (He), méthane ( $CH_4$ ), ammoniac ( $NH_3$ ), cyanure d'hydrogène (HCN), acide chlorhydrique (HCl), acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ), sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ), oxydes de carbone ( $CO_2$  et CO), azote ( $N_2$ )...

L'eau ( $H_2O$ ) est présente également en grande quantité, sous forme liquide et gazeuse. Ce dégazage très intense a duré une dizaine de millions d'années.

L'hydrogène et l'hélium disparaissent rapidement, trop légers pour être retenu durablement par la force de gravitation terrestre.

# Apparition de la vie sur Terre

## Préambule

Nous constatons que la vie existe sur Terre depuis plus de 3 milliards d'années. Aucune trace de vie n'ayant été détectée dans l'espace (jusqu'à maintenant), nous en déduisons (en attendant une éventuelle réfutation) que la vie est apparue sur Terre. L'objectif des scientifiques est de comprendre les mécanismes qui ont conduit de la matière inerte à la matière vivante.

A mon avis, cette quête est sans grand espoir et peut-être même sans grand intérêt car il sera difficile d'apporter des preuves. En effet, la vie sur Terre a détruit les traces des phases préliminaires à son apparition et elle a profondément modifié son environnement.

Néanmoins, la recherche fondamentale est très active car elle a déjà eu des retombées concrètes dans d'autres domaines (médecine, pharmacie) qui n'étaient pas soupçonnées initialement. Nous donnons donc dans les pages qui suivent quelques éléments d'information chimiques et historiques sur le sujet.

## L'évolution chimique

Sur la terre primitive, la température est élevée ( $250^{\circ}\text{C}$ ) à cause de l'effet de serre mais elle va diminuer progressivement car le gaz carbonique responsable de cet effet se dissout dans l'eau où il se combine au calcium pour former des carbonates (du calcaire). Les premiers continents apparaissent progressivement. Ils sont constitués de matériaux légers qui remontent progressivement à la surface de la terre, comme un bouchon remonte à la surface de l'eau.

Un grand nombre de réactions chimiques qui conduiront à l'apparition de la vie vont se produire dans l'atmosphère, dans les océans et sur les continents en formation. Les molécules carbonées qui sont à la base de la chimie organique existent dans l'environnement terrestre sous des formes simples ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{HCN}$ ) mais aussi sous des formes plus complexes (voir chapitre « Milieu interstellaire »). Ces molécules continuent à être apportées à la surface par l'intense bombardement météoritique auquel est soumis la jeune Terre.

Pour synthétiser des molécules organiques complexes, il faut des molécules simples, mais aussi de **l'énergie**. Le rayonnement solaire visible et ultra-violet constitue la source d'énergie essentielle.

L'atmosphère primitive est agitée de violents orages et l'énergie électrique des éclairs peut déclencher des réactions chimiques.

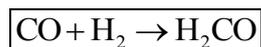
Enfin, l'énergie thermique disponible dans les nombreuses régions du globe où l'activité volcanique est encore très intense a certainement joué un rôle important.



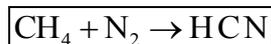
Terre primitive  
(vue d'artiste).

Voici quelques exemples de réaction chimiques simples qui produisent des molécules organiques importantes.

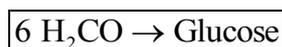
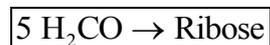
Le monoxyde de carbone peut s'allier à l'hydrogène pour donner le formaldéhyde.



L'acide cyanhydrique déjà présent dans l'atmosphère peut également être produit par réaction du méthane avec l'azote.

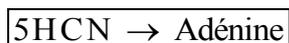


Des réactions plus compliquées peuvent donner des sucres (ribose et glucose) à partir de cinq ou six molécules de formaldéhyde.

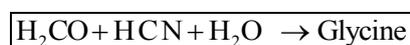


Notons au passage que les molécules de sucre n'ont jamais été détectées dans l'espace interstellaire.

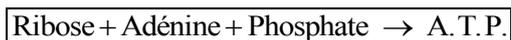
Une base nucléique (l'adénine) qui code l'information dans les chromosomes peut se former à partir de 5 molécules d'acide cyanhydrique.



Un acide aminé (la glycine) qui est une des briques de fabrication des protéines peut se former en combinant une molécule de formaldéhyde, une molécule d'acide cyanhydrique et une molécule d'eau.



Enfin, une réaction un peu plus complexe permet de fabriquer une molécule d'adénosine triphosphate qui constitue le réservoir d'énergie de toutes les cellules vivantes.



Ces réactions ne sont pas toujours simples à réaliser en laboratoire et nécessitent des conditions de température et de pression particulières et l'usage de catalyseurs.

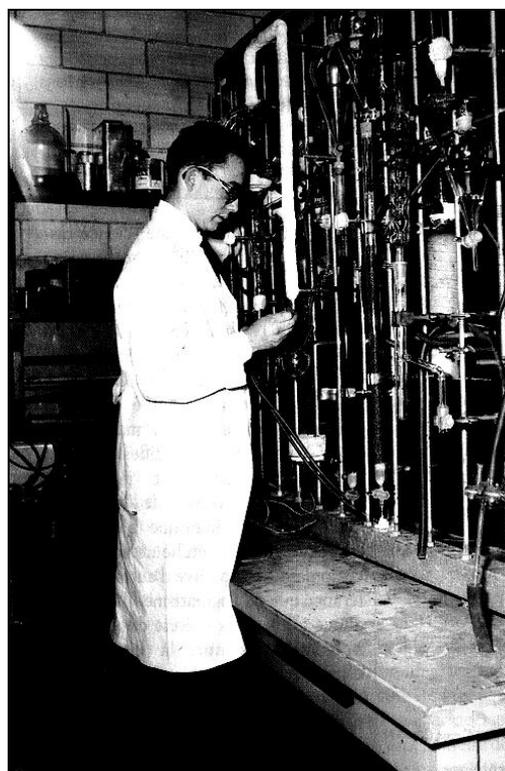
Dans la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, les chimistes étaient donc très réservés sur la possibilité d'existence de ces réactions dans le milieu terrestre naturel.

Mais en 1954, un chercheur américain, Stanley Miller, a montré que de telles réactions chimiques pouvaient se produire dans l'atmosphère primitive.

Il a en effet soumis à des décharges électriques censées simuler des éclairs, un mélange de méthane, d'hydrogène, d'ammoniac et d'eau. Après quelques jours d'expérience, il a obtenu des molécules organiques très variées comme des acides aminés et des sucres.

Cette expérience a été fréquemment renouvelée par la suite en variant la composition du mélange initial et la source d'énergie et elle a toujours permis de produire une grande variété de molécules organiques.

Il est donc fort probable que lors des premiers millions d'années, de la matière organique simple a été produite en abondance.



Stanley Miller dans son laboratoire.

Les petites molécules organiques (monomères) ont la possibilité chimique de se mettre bout à bout pour former de longues chaînes appelées polymères. La synthèse des polymères a probablement été beaucoup plus lente que celle des monomères car les réactions chimiques qui entrent en jeu sont beaucoup plus complexes.

De plus, les produits formés sont souvent instables en milieu aqueux. Cependant, l'évaporation dans des lacs ou des lagunes a pu provoquer la concentration en molécules organiques de ces milieux fermés et favoriser la formation spontanée de vésicules (micelles, microsphères, liposomes) qui ont pu abriter pendant un temps ces molécules fragiles et éventuellement permettre la réaction des produits isolés dans ce milieu fermé.

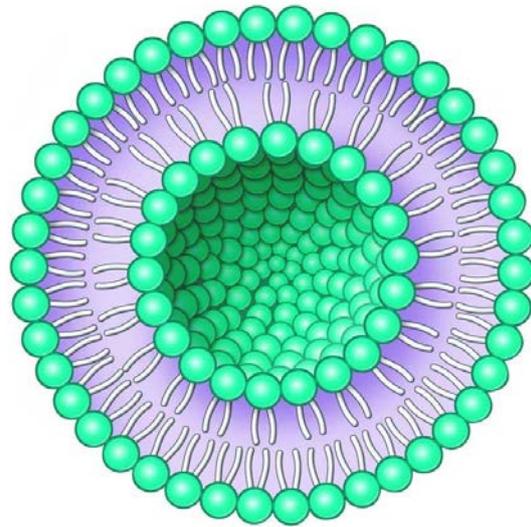


Schéma et coupe d'un liposome. La paroi externe est une double couche de lipides.

Des réactions de polymérisation peuvent également se produire à température élevée et on peut penser que de telles réactions ont eu lieu sur les flancs des volcans (terrestres ou sous-marins) nombreux et actifs sur la jeune Terre.

Les ribozymes sont des brins d'ADN possédant une activité catalytique. Ils ont pu constituer un maillon de boucles catalytiques produisant de la matière organique complexe en grande quantité. On pense également que certaines argiles ont pu servir de catalyseur dans la synthèse de polymères.

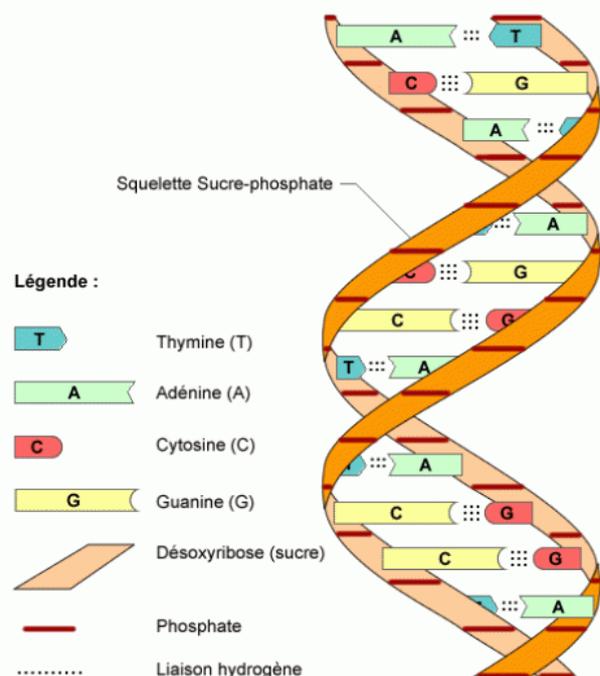
Les expériences de chimie pré-biotique se multiplient et laissent entrevoir de nombreuses possibilités. Les plus récentes (2015) montrent la fabrication possible de chaînes d'ARN capables de s'autorépliquer à partir de brins courts contenant seulement quelques nucléotides.

## Des molécules organiques aux bactéries

Pour essayer d'imaginer comment la vie a pu apparaître spontanément à partir d'un milieu riche en polymères variés, on doit étudier les organismes autonomes vivants les plus simples que sont les bactéries.

Leur mode de fonctionnement est basé sur la synthèse de protéines par un mécanisme biochimique extrêmement complexe. Le codage dans l'ADN est suivi d'une transcription en ARN et d'une élaboration dans les ribosomes par assemblage d'acides aminés.

Ce processus a été éclairci par les professeurs Jacob, Monod et Wolf en 1961.



Double hélice d'ADN.

Comme pour la chimie prébiotique, on ne sait pratiquement rien sur les étapes intermédiaires qui ont dû se produire entre des liposomes riches en ADN et polymères et les bactéries au fonctionnement complexe et délicat. On doit donc se contenter de scénarios plus ou moins vraisemblables.

Nous disposons de quelques indices laissant penser que les bactéries ont été précédées par des organismes plus simples dans lesquels l'information génétique était portée par l'ARN.

Plusieurs types de proto-bactéries ont probablement existé, avec des systèmes de codage des protéines différents. Un phénomène de sélection naturelle a conservé les organismes les plus efficaces qui, après un grand nombre de perfectionnements, ont abouti aux bactéries que nous connaissons actuellement.

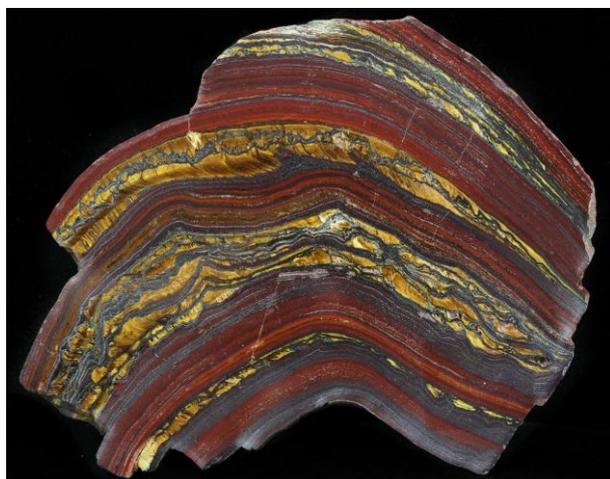
Mais les détails du passage entre les molécules organiques complexes et les ancêtres des bactéries resteront probablement inconnus. A mon avis, il est illusoire d'espérer connaître la façon dont les choses se sont réellement passées il y a plus de 4 milliards d'années. On en restera au stade d'hypothèses plus ou moins vraisemblables mais difficilement vérifiables.

## Les plus vieux fossiles

Les plus vieux fossiles de bactéries ont été découverts dans des formations géologiques particulières appelées stromatolithes.

Ces formations ne sont pas d'origine minérale et résultent de l'activité de colonies de cyanobactéries vivant dans des eaux peu profondes.

Ces colonies de bactéries forment à la longue des structures en forme de monticules ou de piliers constitués de multiples couches horizontales correspondant chacune à une étape dans la croissance de la colonie.



Stromatolithe fossile

Les plus anciennes bactéries fossiles retrouvées dans des stromatolithes datent de 3,5 milliards d'années. On a également des preuves d'activité biologique datant de 3,8 milliards d'années.

Cette dernière date est souvent retenue pour situer l'apparition de la vie bien que celle-ci soit un phénomène continu.

La date de **4,1 milliards d'années** a été avancée récemment.

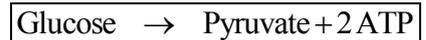
Formations de stromatolithes contemporaines dans la baie de Shark, en Australie.



# Évolution des bactéries

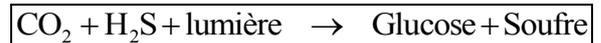
Toutes les cellules vivantes consomment du glucose qui constitue la source d'énergie primordiale. Les premières bactéries ont utilisé le glucose fabriqué en grande quantité lors des premières synthèses qui se sont déroulées sur la Terre primitive.

Une réaction chimique de **fermentation** leur permet, en dégradant une molécule de glucose, de produire deux molécules d'ATP (adénosine triphosphate) qui est le réservoir d'énergie utilisé pour réaliser les autres réactions chimiques indispensables au fonctionnement de la bactérie.

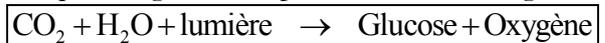


Vers 3 milliards d'années, le glucose s'épuise et on voit apparaître les premières bactéries réalisant la **photosynthèse**.

En effet, certaines bactéries, grâce à des pigments chlorophylliens, utilisent l'énergie solaire pour fabriquer du glucose à partir du dioxyde de carbone et de sulfure d'hydrogène présent en solution dans l'eau.



800 millions d'années plus tard, le sulfure d'hydrogène se fait rare et de nouveaux pigments chlorophylliens permettent à certaines bactéries de fabriquer le glucose à partir d'eau et de gaz carbonique.



Le sous-produit de cette réaction étant gazeux commence par se dissoudre dans l'eau où il réagit avec les ions ferreux (solubles) pour former des hydroxydes de fer insolubles qui précipitent au fond des océans où ils se mélangent avec des sédiments.

Des formations géologiques de fer rubané sont le témoin de cet épisode. Les plus vieilles ont 2,2 milliards d'années, ce qui permet de dater le début du processus qui durera environ 200 millions d'années, jusqu'à ce que tout le fer des océans soit précipité.



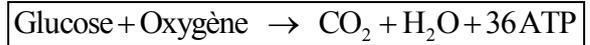
Fer rubané sur le talus d'une route en Afrique du Sud.

Ensuite, l'oxygène se répand dans l'atmosphère où sa concentration augmente progressivement.

Une des conséquences est la formation, dans la haute atmosphère, d'une couche d'ozone qui, en arrêtant les rayons ultraviolets, facilitera le développement ultérieur des organismes vivants.

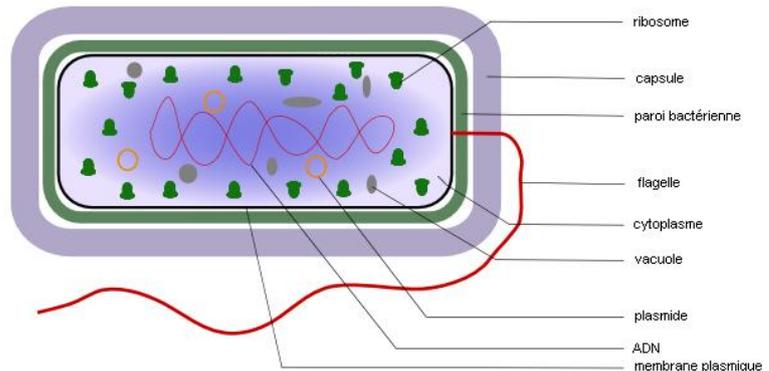
Cependant, l'oxygène est un poison pour les bactéries primitives et on voit apparaître rapidement, vers 1,8 milliards d'années, des bactéries aérobies qui vont utiliser l'oxygène pour transformer le glucose fabriqué par photosynthèse. Cette nouvelle réaction s'apparente à une **combustion** et non plus à une fermentation.

Le bilan de l'opération est très positif puisque ce processus fournit 18 fois plus d'énergie que la fermentation.

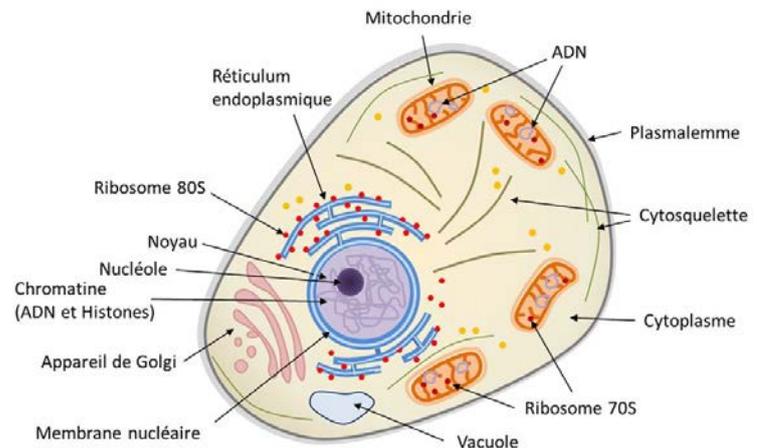


Ce gain de productivité va accélérer l'évolution et conduire vers 1,5 milliards d'années aux premiers protozoaires (organismes unicellulaires à noyau) dont la structure et l'organisation sont nettement plus complexes que celles des bactéries.

Les bactéries primitives (procaryotes) ont une structure et un fonctionnement relativement simples.



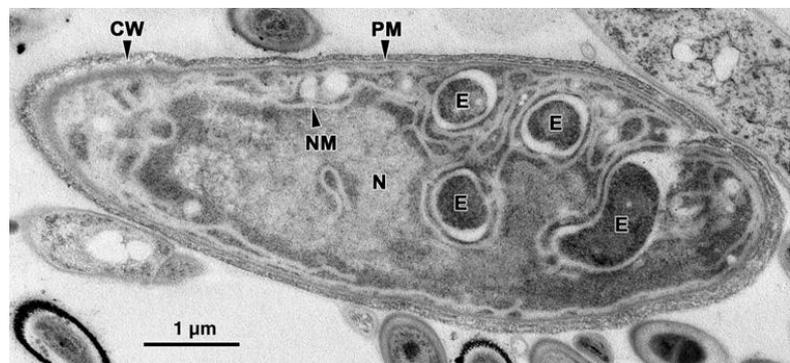
Une cellule à noyau (eucaryote) est beaucoup plus complexe. L'ADN est enfermé dans un noyau et le cytoplasme contient de nombreux organites (mitochondries, chloroplastes, appareil de Golgi, réticulum endoplasmique).



Les deux schémas ne sont pas à la même échelle et la cellule à noyau est 10 à 20 fois plus grosse en dimension que la bactérie, soit 1000 à 10000 fois supérieure en volume.

Il est très probable que l'association de plusieurs bactéries vivant en symbiose ait abouti à la formation de ces êtres unicellulaires.

On a découvert en 2012 un procaryote contenant des organites. On peut le considérer comme un exemple possible d'intermédiaire entre les bactéries et les eucaryotes. Cent fois plus volumineux qu'une bactérie, cet organisme contient des organites endosymbiontes (E), mais pas de mitochondries.



Parakaryon myojinensis

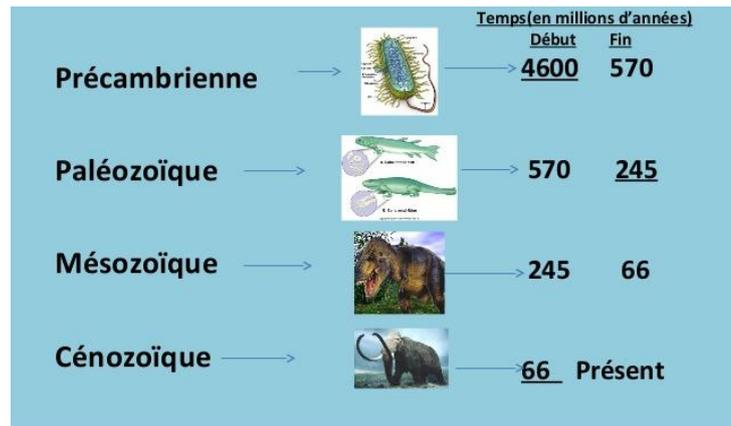
# La fin du Précambrien

## Géochronologie

Jusqu'à maintenant, nous avons évoqué les âges des différents événements. Nous allons devoir parler également en utilisant des termes géologiques car ils sont très fréquemment utilisés dans la littérature.

Le tableau ci-contre montre les grandes ères géologiques.

Le précambrien commence à la formation de la Terre. Il voit donc l'apparition de la vie et les premières étapes de son évolution.



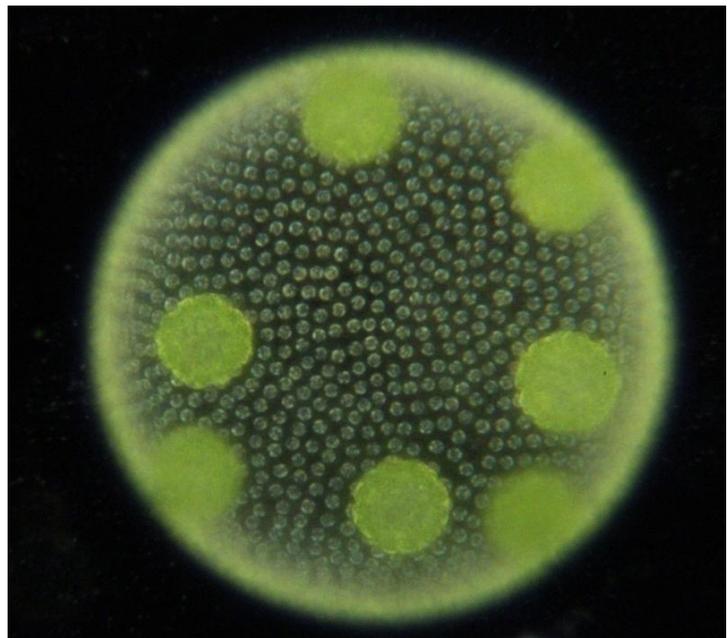
Pour ceux qui seraient plus à l'aise avec les ères primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire, précisons que le paléozoïque correspond à l'ère primaire, le mésozoïque à l'ère secondaire, et que le cénozoïque regroupe les ères tertiaire et quaternaire.

## Évolution des protozoaires

Après l'évolution des bactéries et l'apparition des eucaryotes il y a 1,5 milliards d'années, on assiste maintenant au passage des protozoaires (unicellulaires) aux métazoaires (pluricellulaires).

Ce passage se fait progressivement grâce à l'apparition de colonies de protozoaires comportant un nombre croissant de cellules. La spécialisation de certaines cellules augmente l'efficacité de la colonie.

Volvox est une colonie cellulaire actuelle (algue verte) dont les constituants sont les petites cellules. Les grosses sphères vertes sont de jeunes colonies filles, produites par reproduction asexuée.



L'apparition de la **reproduction sexuée** est l'événement essentiel de cette période car elle constitue un mécanisme important de l'évolution. Elle existe déjà chez les bactéries sous une forme très primitive puisqu'elle consiste en un simple échange de matériel génétique. Elle se perfectionne chez les



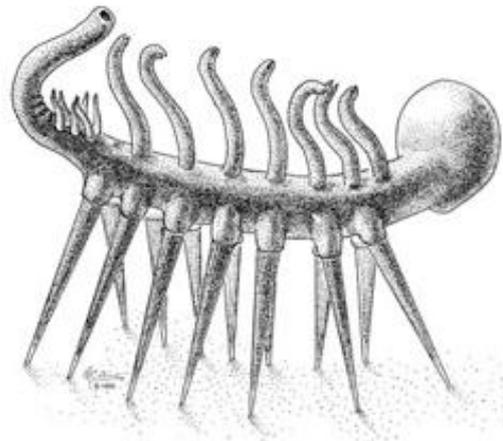
## L'explosion cambrienne

Le cambrien est la première époque de l'ère paléozoïque. Il commence il y a 550 millions d'années. Il est marqué par une très grande diversification des espèces animales et par l'apparition d'un squelette interne ou externe chez certaines d'entre elles.

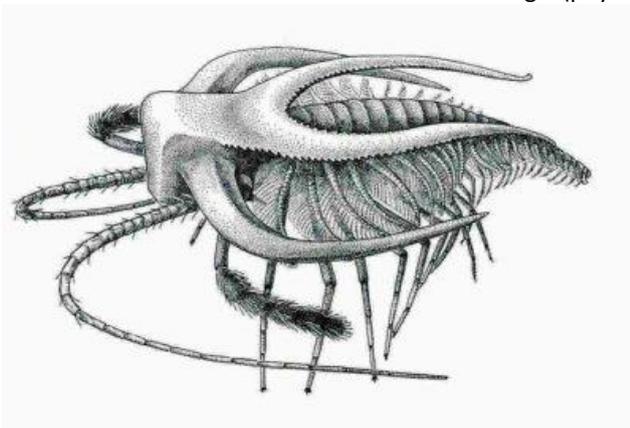
Le gisement de fossiles le plus représentatif du début du cambrien est celui de Burgess, situé à l'ouest du Canada. Il a été découvert au début du XX<sup>ème</sup> siècle mais une réinterprétation complète et détaillée des fossiles a été faite entre 1970 et 1980. Elle montre une très grande variété d'organisation des différents animaux et la présence de différents spécimens des grands embranchements actuels comme les annélides (vers), les arthropodes (insectes, crustacés), les mollusques (huîtres, escargots) et les vertébrés. D'autres gisements (Groenland, Chine, Australie), ont fourni des spécimens de cette époque.

On y trouve également de nombreux individus inclassables qui ont disparu sans descendance, ce qui permet de penser que cette explosion de vie au cambrien a été suivie d'une période d'extinction sévère.

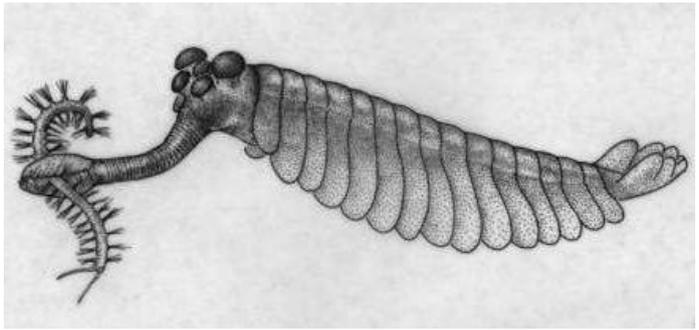
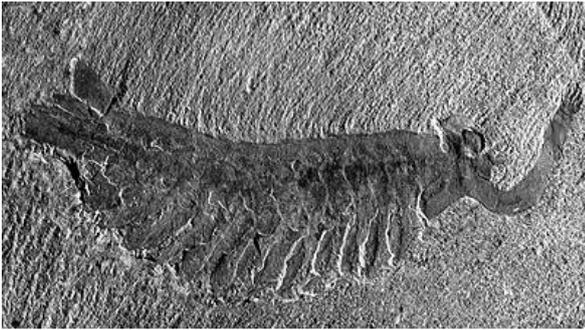
Les dessins et fossiles ci-dessous montrent quelques spécimens de la faune de Burgess.



Hallucinegia (phylum sans descendance)



Marella (arthropode)



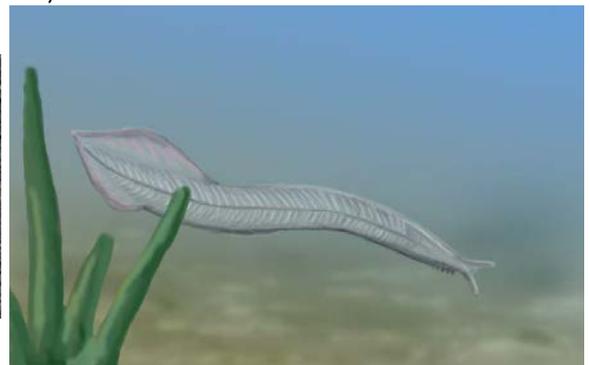
Opabinia (genre indéterminé)



Sydneyia



Yohoia (arthropode)



Pikaia (chordé)

Ce dernier animal est un chordé, espèce qui est l'ancêtre des vertébrés.

# Des vertébrés aux reptiles

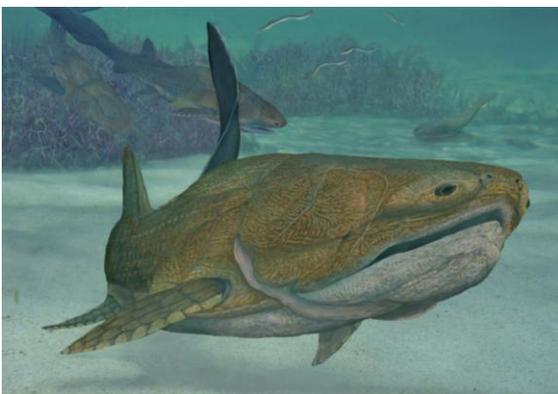
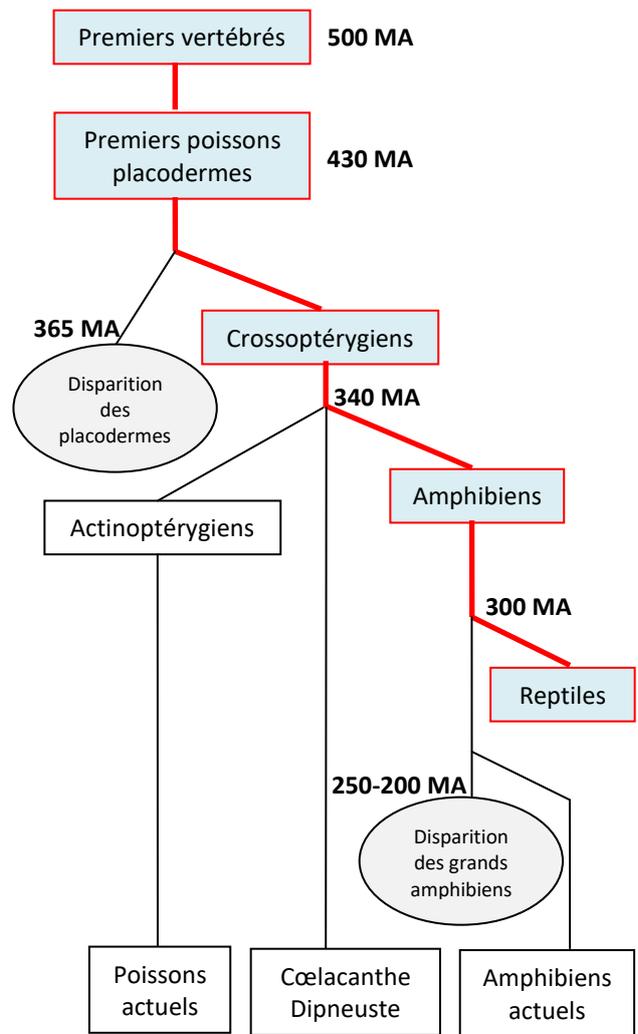
Nous nous intéressons maintenant uniquement à la branche de l'évolution qui a conduit des premiers vertébrés aux reptiles, aux mammifères, aux primates, et enfin, à l'homme.

Les **chordés**, ancêtres des vertébrés, apparaissent au cambrien et sont présents dans la faune de Burgess. Ils vont donner naissance aux premiers poissons **placodermes** qui possèdent un squelette interne constitué d'une colonne vertébrale rudimentaire portant certains prolongements. Ceux-ci soutiennent les parois du corps et formeront par la suite les nageoires des poissons et les membres locomoteurs des vertébrés terrestres. Ces animaux doivent leur nom à la présence de plaques externes protectrices.

Les placodermes disparaissent à la fin du dévonien, vers 350 millions d'années après avoir donné naissance aux **crossoptérygiens** qui ont développé leur squelette interne et transformé les plaques externes en écailles. Ils portent des nageoires courtes et trapues ayant une forme de lobe.

Au dévonien moyen (360 millions d'années), ils constituent le groupe le plus commun des poissons d'eau douce.

Les survivants actuels de ce groupe sont le coelacanthe, un poisson que l'on trouve entre l'Afrique et Madagascar et les dipneustes que l'on trouve dans les eaux douces ou saumâtres en Afrique du sud, en Amérique du nord et en Australie.



Placoderme



Coelacanthe actuel

Les dipneustes possèdent un poumon fonctionnel rudimentaire qui leur permet de survivre lors de périodes de sécheresse pendant lesquelles ils s'enfoncent dans la boue et vivent au ralenti en attendant le retour d'une période humide.

Dipneuste australien



Ces animaux possèdent également des pattes-nageoires qui leur permettent d'effectuer de courts déplacements terrestres entre deux points d'eau. On pense que les ancêtres de ces animaux ont donné naissance à la fin du dévonien aux **amphibiens** qui ont commencé l'invasion du milieu terrestre où ils avaient été précédés par les végétaux, les vers et les insectes.

Les amphibiens vont se diversifier pendant toute la fin du paléozoïque mais ils restent tributaires du milieu aquatique pour leur reproduction et leur développement.

Sclerocephalus



Les premiers **reptiles** apparaissent au carbonifère moyen (300 millions d'années), une des dernières époques du paléozoïque.

Ils se libèrent totalement du milieu aquatique pour leur reproduction grâce à un nouveau type d'œuf qui comprend deux membranes : une membrane interne, l'amnios qui entoure la cavité amniotique à l'intérieur de laquelle le fœtus se retrouve dans un milieu aquatique et une membrane externe, l'allantoïde, qui assure les échanges d'oxygène et de gaz carbonique avec le milieu extérieur. La plupart des reptiles sont ovipares, mais certains sont vivipares.

# Des reptiles aux primates

Après la disparition des grands amphibiens (entre 250 et 200 millions d'années), les reptiles vont dominer le Mésozoïque (ère secondaire).

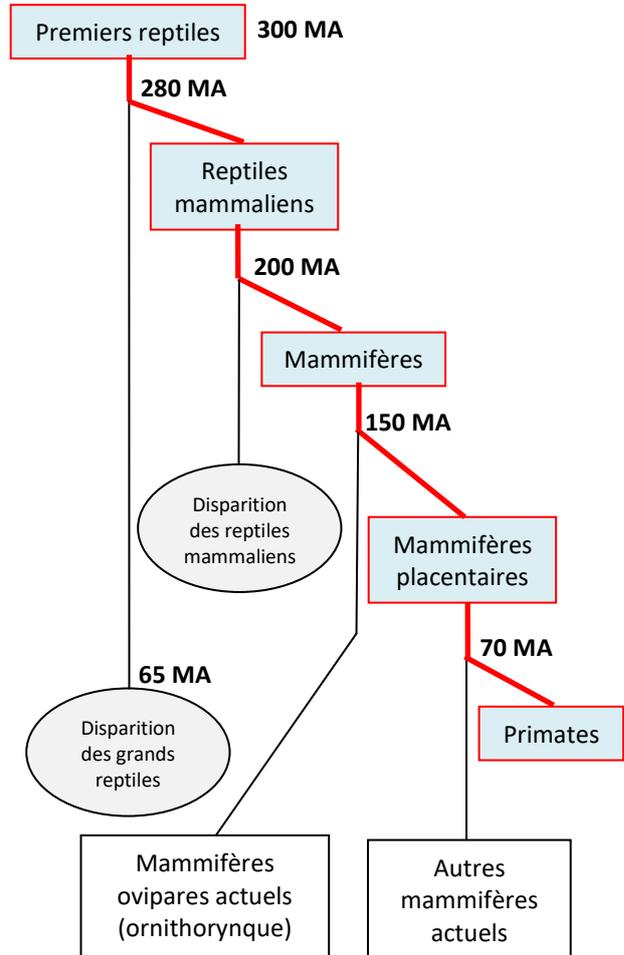
Un groupe proche des Dinosaures donnera naissance aux oiseaux.

D'autres groupes de reptiles (les Synapsides) développent des caractères mammaliens primitifs et un début de régulation thermique.

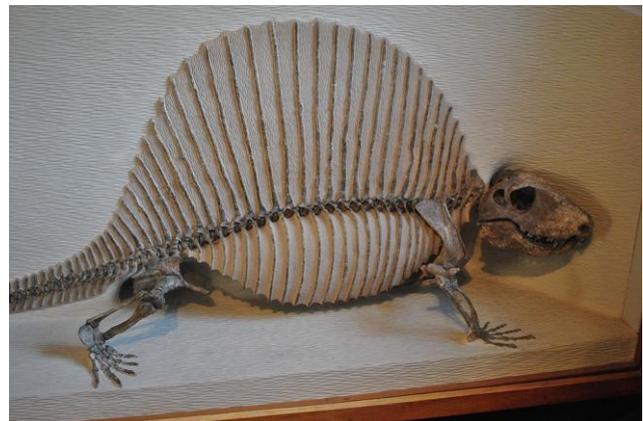
Ces **reptiles mammaliens** vont donner naissance vers la fin du Trias (200 millions d'années) aux mammifères vrais qui se divisent rapidement en deux groupes : les mammifères ovipares et les **mammifères vivipares**.

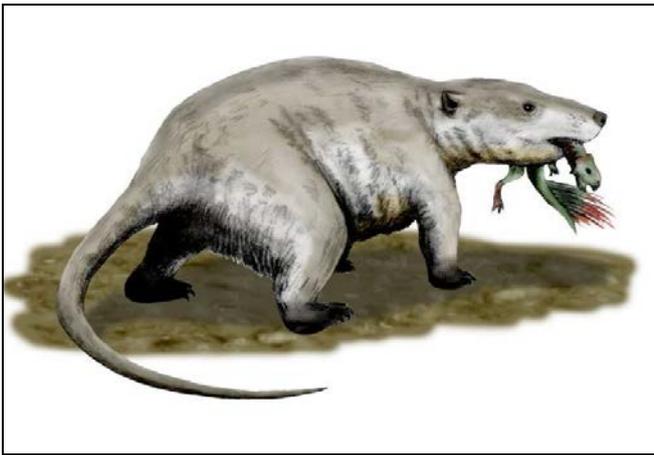
Ce deuxième groupe va donner rapidement naissance aux **mammifères placentaires**. Les échanges gazeux du fœtus se font avec la circulation sanguine maternelle, à travers le placenta qui a remplacé l'allantoïde.

Ces animaux restent de petite taille car les Dinosaures règnent en maître sur pratiquement toutes les niches écologiques. Ils font face à la concurrence grâce à une régulation thermique efficace et au perfectionnement de leur système nerveux central.



Dimetrodon (reptile mammalien), 3 à 4 mètres, 280 à 260 MA





Repenomanus (mammifère).  
Environ 1 m ; 130 MA

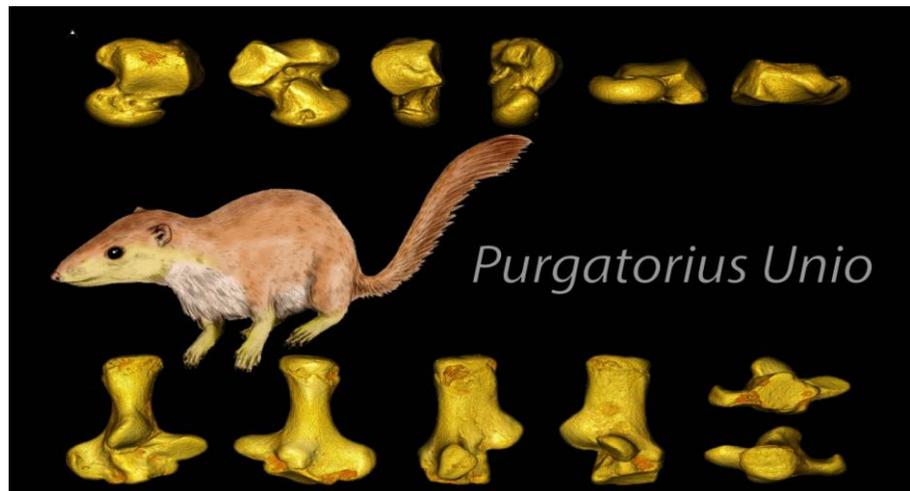


Crâne de *Vintana* dégagé et sa reconstitution  
(mammifère placentaire ; 70 MA)

Les premiers **primates** apparaissent avant la fin du Mésozoïque, vers 70 millions d'années, peu avant la disparition des grands reptiles qui se produira lors de la grande extinction qui marque la limite entre le Mésozoïque et le Cénozoïque, il y a 65 millions d'années. On l'appelle également la limite C-T (Crétacé-Tertiaire) Le Crétacé est la dernière époque du Mésozoïque et le Tertiaire est l'ancienne appellation du début du Cénozoïque.

Le plus ancien fossile probable de primate a été trouvé en 1965 dans un site du Montana, en Amérique du Nord, dans les Montagnes Rocheuses. Il date de la fin du Crétacé, vers 66 millions d'années et a été baptisé Purgatorius. Il a la taille d'un petit rat, vit dans les arbres et se nourrit de fruits et d'insectes.

Reconstitution de Purgatorius à partir de quelques os et dents.



L'homme étant un **primate**, nous donnons ici quelques-unes des caractéristiques de ce groupe.

- Membres à 5 doigts terminés par des ongles au lieu de griffes
- Pouce opposable (sauf pour les pieds de l'homme)
- Yeux frontaux permettant une vision binoculaire
- Cerveau développé par rapport au reste du corps

# L'évolution

Avant de continuer notre histoire, il est temps de se poser quelques questions sur les mécanismes de l'évolution.

## Histoire

Pendant très longtemps, l'observation des fossiles, certes peu nombreux, n'a pas provoqué d'interrogations puisque, en occident, le récit biblique apportait toutes les réponses utiles aux éventuelles questions.

Les premières idées concernant l'évolution des espèces datent du début du XIX<sup>ème</sup> siècle avec la théorie transformiste de Lamarck.

Mais la véritable révolution a été apportée par Darwin dans son livre « L'origine des espèces » (1859).

Les principaux mécanismes de l'évolution n'étaient pas connus à l'époque de Darwin et la lecture complète du titre en donne une idée vague et très réductrice (lutte pour la vie).

Il a fallu attendre le XX<sup>ème</sup> siècle pour mieux comprendre les mécanismes de l'évolution, avec la redécouverte des lois de la génétique (1900 Mendel), la découverte de la structure de l'ADN (1953, Watson et Crick), et celle du détail du fonctionnement cellulaire.

## Mécanismes

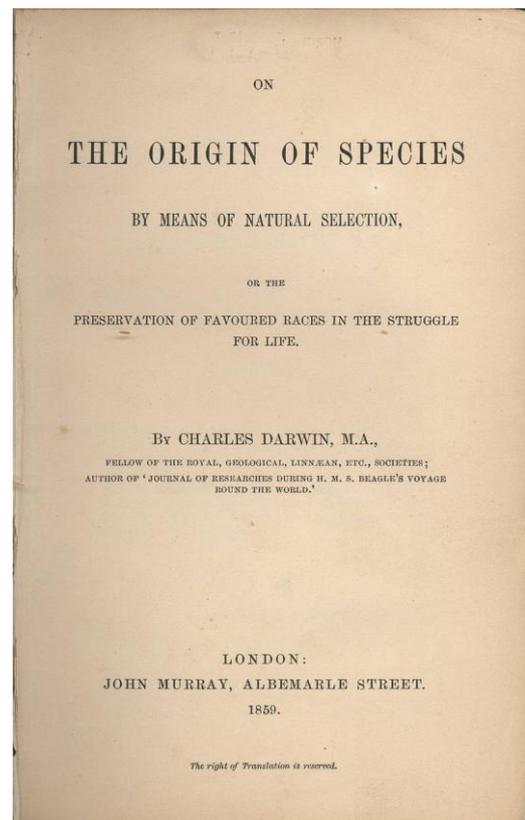
Le moteur essentiel de l'évolution est constitué par ce que l'on appelle la **variabilité génétique**.

Les **mutations** sont une des deux causes de la variabilité génétique. Elles peuvent prendre des formes très variées, allant du simple remplacement d'une base nucléique dans un gène aux remaniements chromosomiques en tout genre (inversion, transfert, fusion, fission).

L'autre cause de la variabilité génétique est la **reproduction sexuée** qui fabrique un être totalement nouveau héritant de la moitié du patrimoine génétique paternel et de la moitié du patrimoine maternel. A part les jumeaux vrais, deux individus distincts ont des patrimoines génétiques différents.

Le deuxième moteur de l'évolution est **l'interaction** des individus **avec l'environnement** au sens large. Celle-ci peut prendre des formes variées.

La **géologie** y joue un rôle très important car la tectonique des plaques (la dérive des continents) modifie en permanence la géographie de notre globe. Elle provoque l'apparition ou la disparition des mers qui abritent une très grande partie de la vie aquatique. Elle fait surgir des chaînes de montagne qui vont provoquer un isolement géographique des individus situés de part et d'autre. Elle a une influence prépondérante sur le **climat**. Un changement de pluviosité ou de température sur une partie du monde aura forcément des conséquences importantes pour les espèces qui peuplent ces régions. Toute la chaîne alimentaire sera modifiée. Ces phénomènes géologiques étant relativement lents, ils vont provoquer une évolution douce.



« De l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle, ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie. »

Certains phénomènes sont beaucoup plus brutaux et correspondent aux grandes extinctions traitées dans le paragraphe suivant.

## Les grandes extinctions

Les spécialistes s'accordent sur l'existence de cinq extinctions de masse. Les dates évoluent en fonction du perfectionnement des méthodes de datation et les valeurs que nous donnons ici peuvent être sujettes à quelques fluctuations.

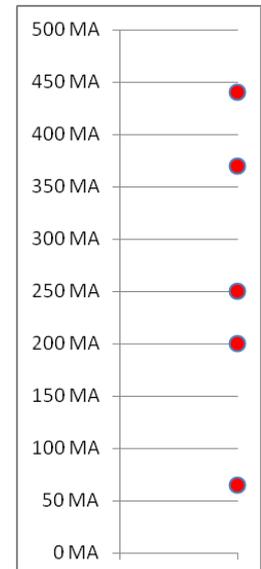
Extinction de l'**Ordovicien** : **440 millions d'années**. Elle marque la limite entre l'Ordovicien et le Silurien qui sont deux époques de l'ère Paléozoïque.

Extinction du **Dévonien** : **370 millions d'années**. Toujours dans le Paléozoïque, elle se situe à la limite des âges Frasnien et Famennien appartenant au Dévonien.

Extinction du **Permien** : **250 millions d'années**. Elle marque la limite entre le Paléozoïque et le Mésozoïque.

Extinction du **Trias-Jurassique** : **200 millions d'années**. Le Trias et le Jurassique sont deux époques du Mésozoïque (ère secondaire).

Extinction du **Crétacé-Tertiaire** : **65 millions d'années**. Cette extinction marque également la limite entre le Mésozoïque et le Cénozoïque.



Les causes de ces grandes extinctions ont été longuement débattues, surtout l'extinction C-T qui a vu la disparition des grands reptiles et a permis le développement des primates.

On s'accorde pour penser qu'une chute brutale de la température de la Terre est la cause de ces extinctions massives. Cette baisse de température peut avoir deux causes tout à fait distinctes : la chute d'une grosse **météorite** ou une **éruption volcanique** très importante. Dans les deux cas, une grande quantité de matière est projetée dans l'atmosphère. Elle va provoquer un obscurcissement et une baisse importante de la température qui peut durer quelques dizaines d'années.

Pour l'extinction C-T, il y a probablement eu conjonction des deux phénomènes car on a retrouvé des traces d'un cratère d'impact au Mexique (au large de la péninsule du Yucatan) ainsi que celles d'une activité volcanique intense en Inde (trapps du Deccan).

## Réflexions

On parle souvent de théorie de l'évolution, ce qui constitue, à mon avis, une erreur grossière. Une théorie, au sens mathématique et physique du terme, pose des postulats et confronte les conséquences logiques de ces postulats aux observations ou aux résultats expérimentaux.

Rien de tel ici. L'évolution est seulement la façon la plus simple d'interpréter l'observation des fossiles. Pas de postulat, sauf celui qui consiste à exclure à priori une intervention divine.

D'un point de vue purement pédagogique, le verbe « adapter » est générateur de contresens. Dans le contexte d'une vie humaine, l'adaptation sous-entend une démarche volontaire (ou parfois subie) des individus. Dans le cas de l'évolution, il s'agit toujours d'une adaptation subie.

Quand un changement de l'environnement se produit, les animaux ou les végétaux n'entreprennent aucune démarche volontaire d'adaptation. Si, grâce à la **variabilité génétique**, il existe dans une espèce existante des individus **pré-adaptés** aux nouvelles conditions de vie, l'espèce survit mais une partie du patrimoine génétique disparaît (celui des individus inadaptés). Si le nombre d'individus pré-adaptés est trop faible, l'espèce disparaît.

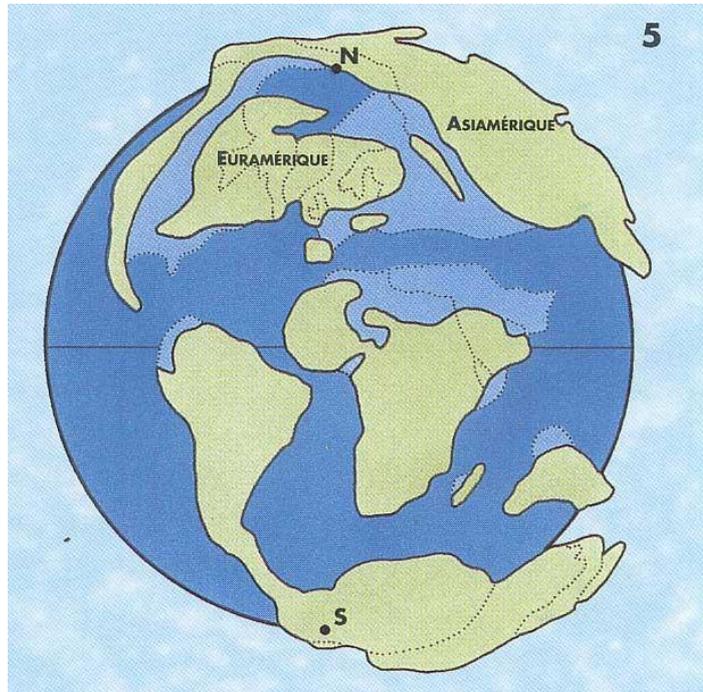
Les débats sont loin d'être clos dans une science complexe qui progresse grâce à la découverte de nouveaux fossiles et à l'évolution des connaissances en génétique.

# Des primates aux grands singes

## Évolution des primates

Après la disparition des grands reptiles il y a **65 millions d'années**, les primates vont se développer rapidement en occupant les niches écologiques laissées libres.

Leur évolution est très intimement liée à la dérive des continents. En effet, à la fin du Crétacé, l'Amérique du Nord et l'Eurasie forment un seul continent (Euramérique) et c'est sur ce bloc continental que commence le développement des primates.



Un squelette quasi complet de primate vieux de **55 millions d'années** a été découvert en Chine en 2013.

Le fossile a été virtuellement dégagé de sa gangue par exploration aux rayons X grâce au synchrotron européen de Grenoble.

L'image en 3 dimensions ainsi obtenue a permis une étude détaillée de ce fossile et son classement dans l'arbre évolutif.

Comme pour la plupart des primates évoqués dans ce document, sa place parmi les ancêtres possibles de l'homme est encore débattue.

Cet animal a été baptisé Archicebus Achilles. Il mesure 7 centimètres de long avec une queue de 13 cm.



Image tirée de la reconstitution 3D.

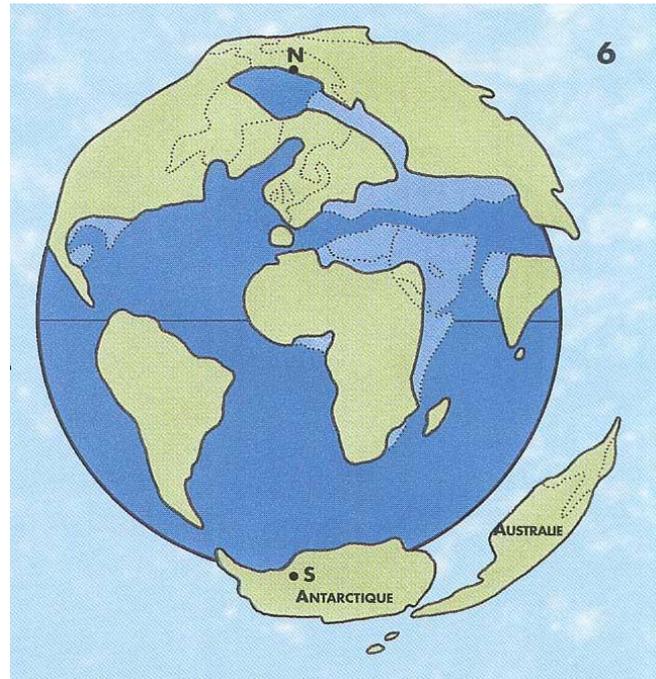


Vue d'artiste.

Vers 50 millions d'années, l'Amérique du Nord se sépare de l'Eurasie et l'Afrique établit un contact avec l'Europe au niveau de Gibraltar.

Les primates peuvent donc à ce moment peupler l'Afrique.

Vers 30 millions d'années, la communication euro-africaine est rompue et les populations africaines sont isolées des autres primates.



Les fossiles de primates découverts dans le gisement du Fayoum (100 kms au sud du Caire) possèdent un certain nombre de caractéristiques qui en font de bons candidats pour appartenir à la lignée préhumaine.

L'un d'entre eux, **Aegyptopithecus** (34 millions d'années), possède la taille d'un gibbon actuel et se nourrit essentiellement d'herbes et de fruits.



Aegyptopithecus

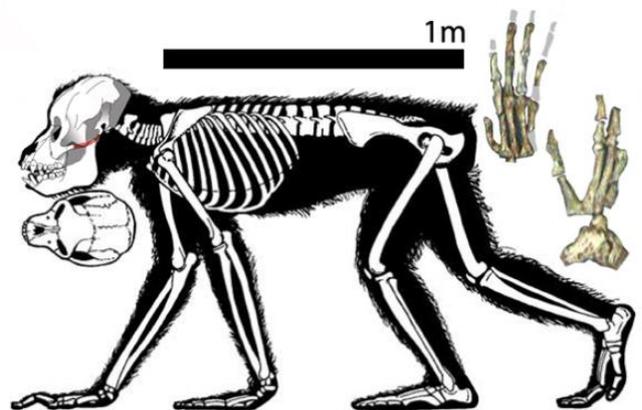
## Les grands singes

L'appellation savante des « grands singes » est la superfamille des **Hominoïdes**. Ils se différencient des primates qui les ont précédés par la **disparition de la queue** et la formation du coccyx.

Les représentants actuels des Hominoïdes sont l'homme, le chimpanzé, le bonobo, le gorille, l'orang-outang et le gibbon.

Un ancêtre possible (mais discuté) de cette superfamille est le **Proconsul** qui vivait en Afrique (Kenya et Ouganda) entre 22 et 14 millions d'années.

Sa dentition laisse penser qu'il est essentiellement fructivore.



La collision entre l'Afrique et l'Arabie (qui appartient géologiquement au continent asiatique) se produit vers 17 millions d'années. Elle permet le passage de primates africains sur le continent euro-asiatique, mais les ancêtres probables de l'homme restent africains.

# Des grands singes à l'homme

## Avertissement

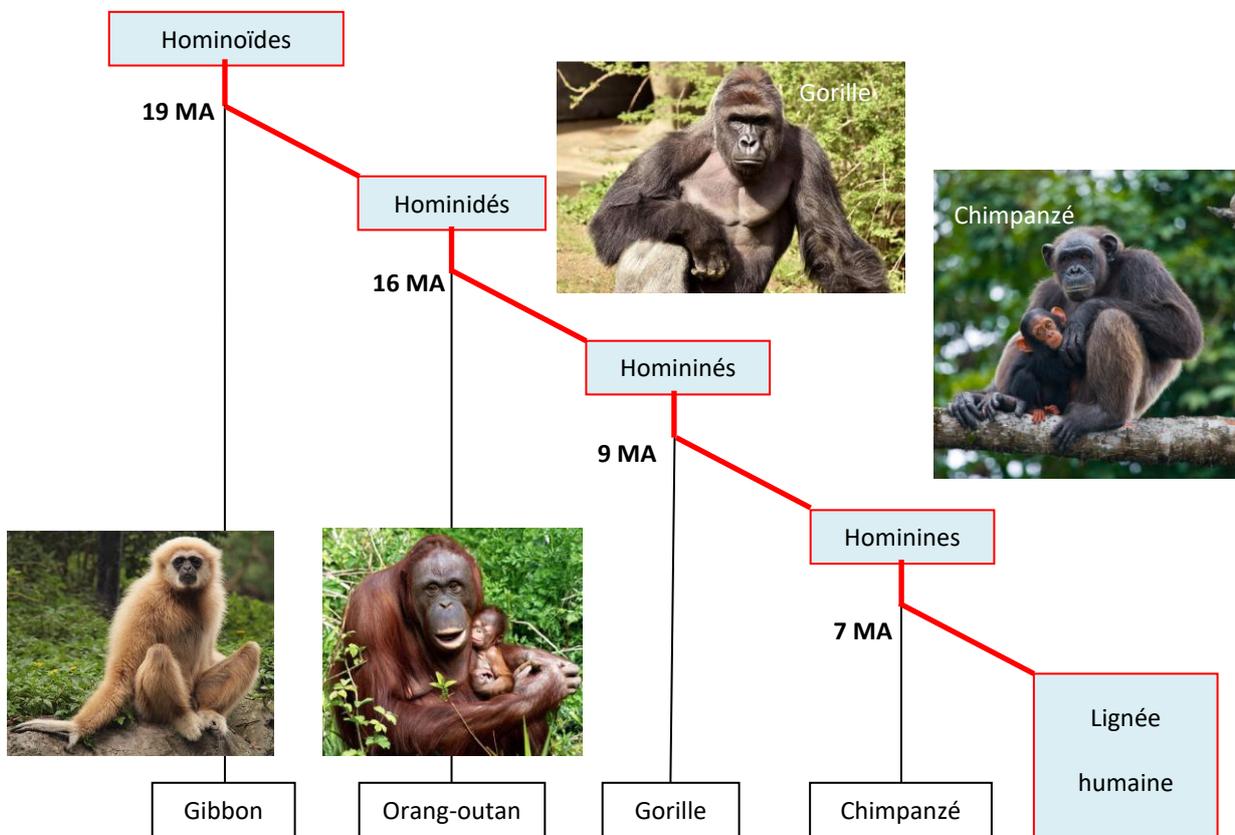
Dans le domaine de la paléontologie, les connaissances évoluent en permanence avec la découverte de nouveaux fossiles ou avec la réinterprétation de matériel ancien. De plus, tout ce que je vais écrire sur le sujet est un résumé de mes lectures faisant intervenir mon interprétation personnelle de non spécialiste.

La génétique fait également son incursion dans la recherche des ancêtres de l'homme en établissant des distances génétiques entre les espèces actuelles et estimant des dates de divergences entre celles-ci. Des avancées récentes ont permis récemment le séquençage de l'ADN de Néandertaliens et d'établir le degré de métissage entre ceux-ci et les Homo sapiens venus d'Afrique.

Nous approchons de la fin de l'histoire et les découvertes de ces 30 dernières années montrent combien celle-ci peut être fluctuante. Le contenu de ce chapitre est donc un instantané de ce qui se dit et s'écrit en ce moment sur le sujet. Il n'aurait pas été le même il y a 10 ans et il serait probablement différent dans 10 ans.

L'essentiel des informations données ci-dessous provient du numéro Hors de série de « La Recherche » (n°17 – Mars-Avril 2016).

## Appellations et divergences des grands singes

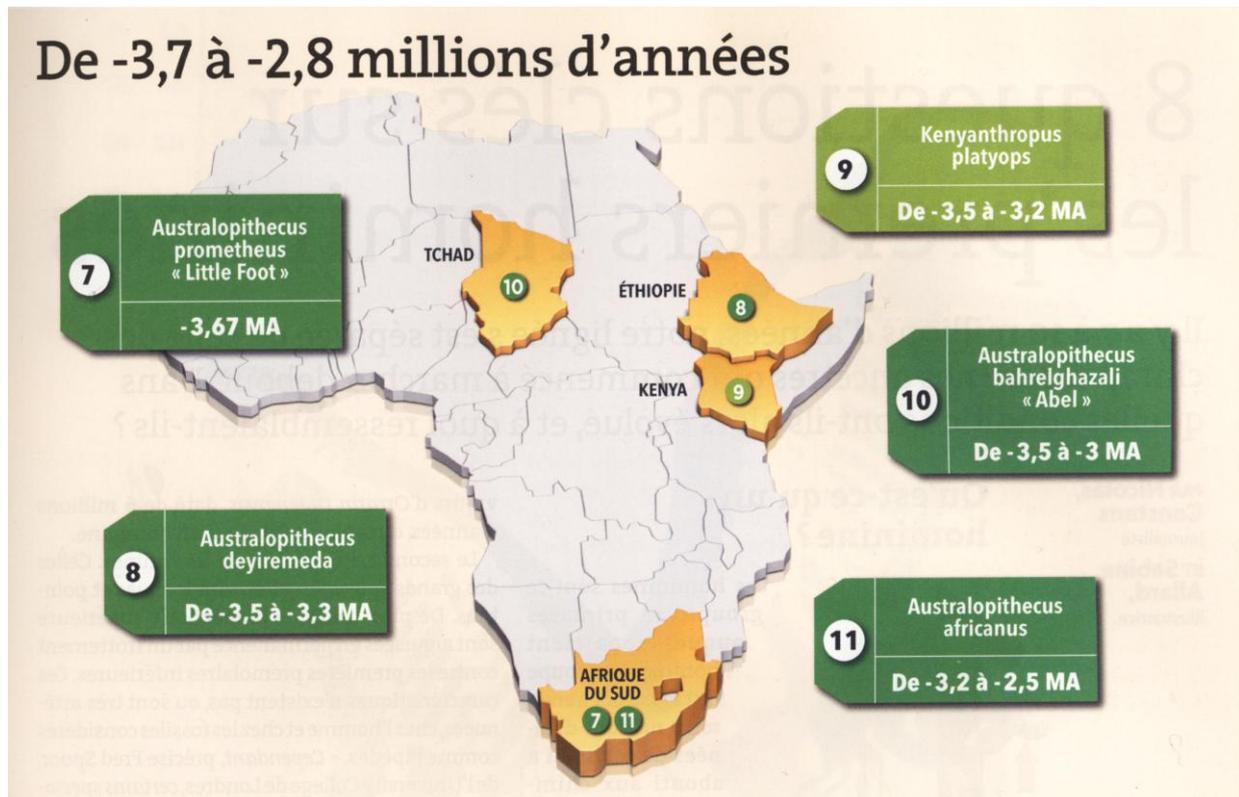
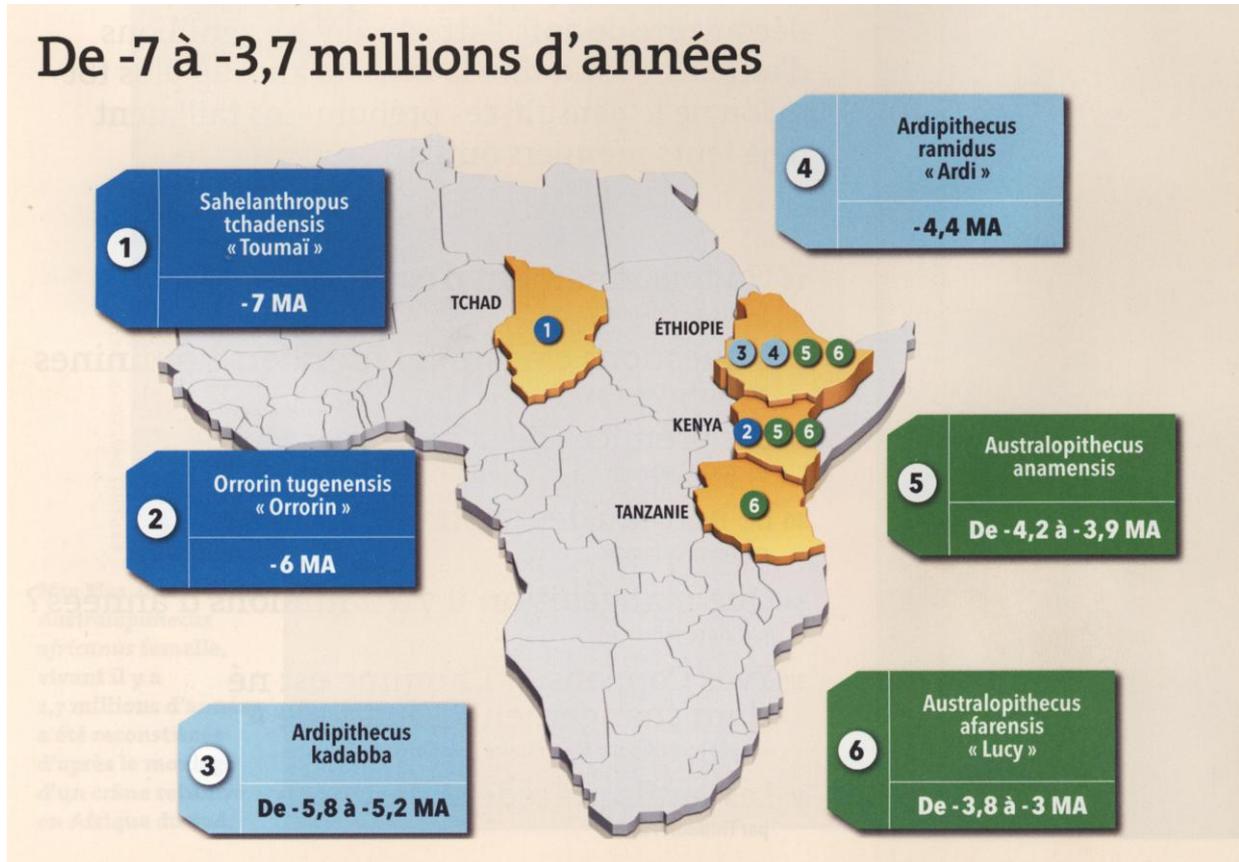


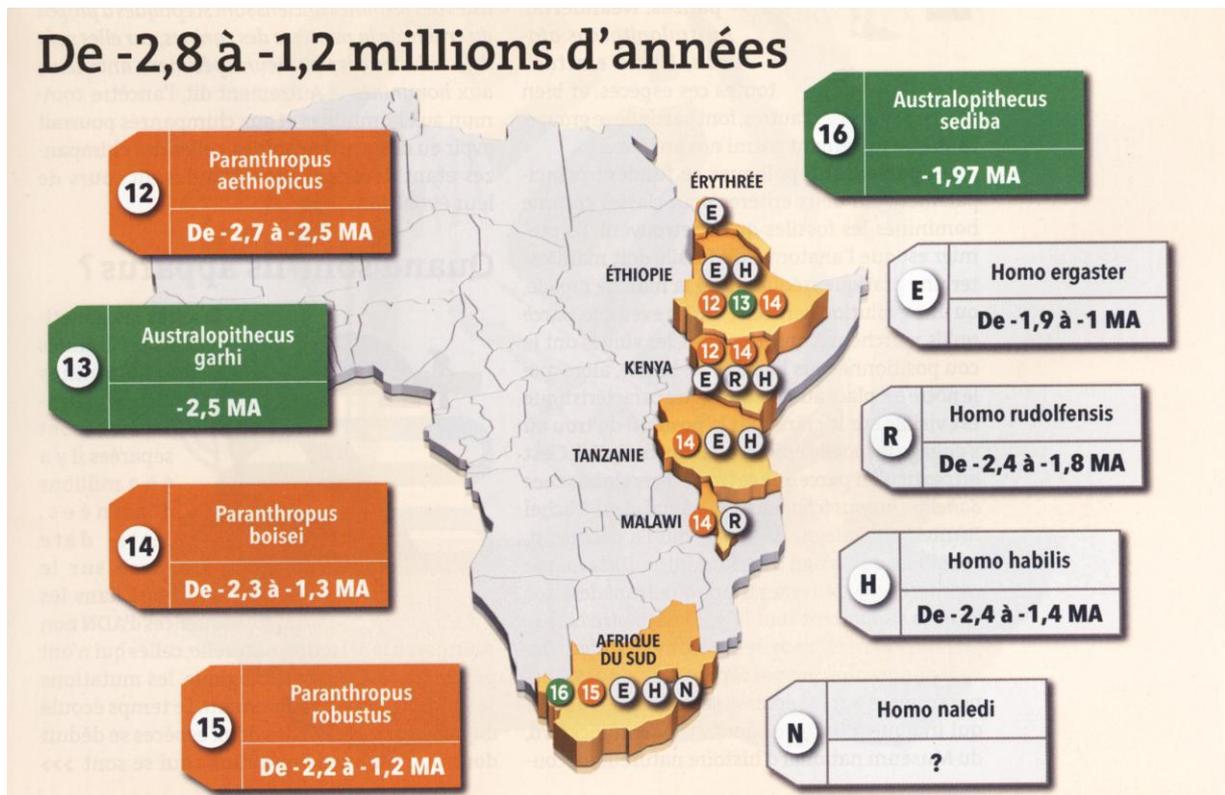
La date de séparation entre les ancêtres des chimpanzés et ceux de l'homme actuel est controversée : 5 à 7 millions d'années pour les généticiens mais 7 à 10 millions d'années pour certains paléanthropologues.

## La lignée humaine

Lors de ces 30 dernières années, la découverte de très nombreux fossiles complique considérablement la compréhension de l'évolution de la lignée humaine.

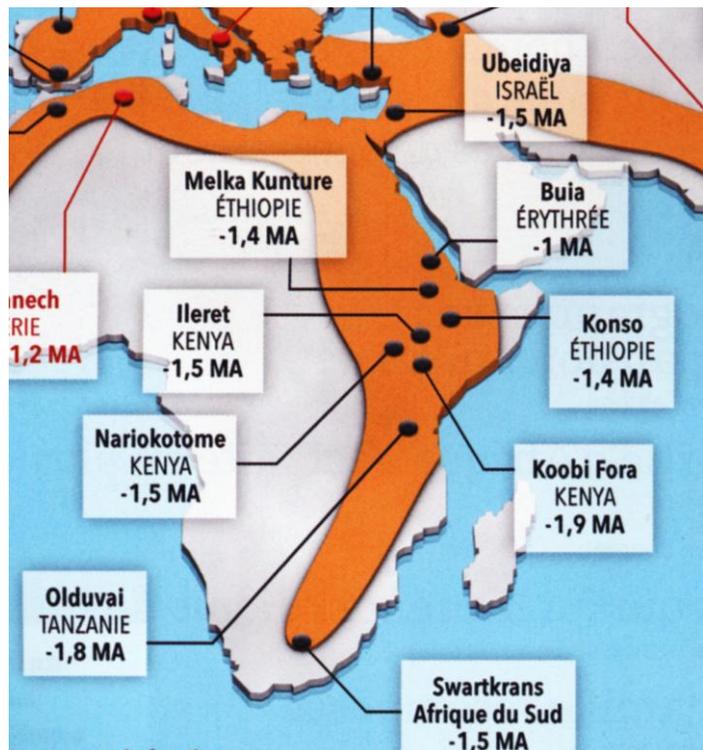
Nous donnons ci-dessous les schémas scannés dans la Recherche montrant le nom, la datation et la localisation de ces fossiles.





La carte ci-contre montre les lieux de découvertes des fossiles africains d'**Homo erectus** entre 1,9 et 1 MA.

Difficile de s'y retrouver !



On notera cependant l'existence de fossiles isolés (1, 2, 3, 4, 9) et de quatre groupes :

- les **australopithèques** entre 4,2 et 2 MA
- les **paranthropes** entre 2,7 à 1,2 MA
- les homos – **habilis**/rudolfensis – entre 2,4 et 1,4 MA
- les homos – **erectus**/ergaster – entre 1,9 et 1 MA

Ces différents groupes ont coexisté en Afrique à certaines époques.

**Homo erectus/ergaster est le seul groupe qui survit après 1 MA.**

A l'heure actuelle, il n'existe aucun consensus dans la communauté scientifique permettant d'établir une filiation sérieuse entre ces groupes. Chaque découverte de fossiles apporte davantage de questions que de réponses.

L'hypothèse d'une évolution linéaire a longtemps eu cours avec l'espoir de la découverte du fameux « chaînon manquant ». Elle est maintenant abandonnée et on lui préfère l'idée d'une **évolution buissonnante** relativement complexe.

Ci-dessous, quelques fossiles remarquables.



La célèbre Lucy appartient à l'espèce *Australopithecus afarensis*. Elle a été découverte en 1974 sur le site de Hadar, en Éthiopie, par une équipe de recherche internationale. Ce fossile est complet à 40 % et date d'environ 3,3 MA. Ce squelette a apporté la preuve que l'acquisition de la bipédie datait d'au moins 3 millions d'années.



Crâne de Koobi Fora (Kenya) daté 1,9 MA.  
Il est attribué à l'espèce *Homo rudolfensis*.



Garçon de Turkana (Kenya) daté entre 1,6 et 1,5 MA, découvert en 1984.  
Il est attribué à l'espèce *Homo ergaster/erectus*.

# La bipédie

Les caractéristiques physiques de la bipédie se retrouvent sur de nombreux éléments du squelette.

Un des plus importants est la place du **trou occipital**, orifice par où passe, entre autres, la moelle épinière. Plus l'espèce est bipède, plus ce trou va se trouver au centre, sous le crâne.



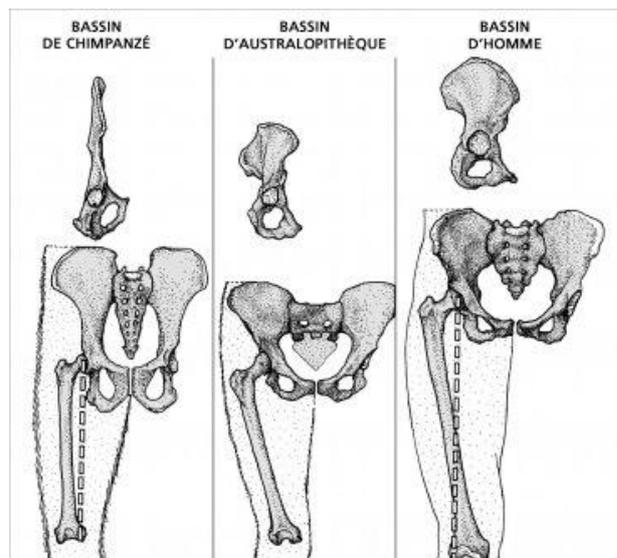
Chimpanzé - Australopithèque - Paranthrope - Homo sapiens

La quadruple courbure de la **colonne vertébrale** des bipèdes permet de mieux amortir les chocs et les tensions dus à la marche bipède.

Le **bassin** est plus large et plus bas dans l'anatomie générale des bipèdes. Plus robuste également, il permet de soutenir les viscères et le poids du tronc.

La forme, la taille et l'articulation du **fémur** sur le bassin nous renseignent sur la possibilité de tenir debout. Il est plus long et incliné chez les bipèdes.

Enfin, les articulations du **coude** et du **genou**, la forme du pied et les traces d'insertion des muscles peuvent également apporter des informations sur le degré de bipédie d'un individu.



Le plus ancien témoignage de la bipédie dans la lignée humaine nous est donnée par **Toumaï** (7 MA) grâce à la position du trou occipital caractéristique de la station debout.

Chez **Orrorin** (6 MA) on n'a pas retrouvé le crâne, mais les fémurs montrent des signes associés à la bipédie. Cependant, les membres antérieurs révèlent une très bonne aptitude pour grimper aux arbres.

**Ardipithecus ramidus** (4,4 MA) possède également cette double locomotion.

Les **Australopithèques** qui apparaissent vers 4,2 MA semblent bien adaptés à la marche bipède mais ils ont encore de grandes capacités pour grimper aux arbres.



Traces de pas : 3,75 MA

Ce n'est qu'avec **Homo erectus** (environ 2 MA) que la bipédie prend la forme que l'on connaît aujourd'hui. Cette espèce est capable de marcher et de courir sur de longues distances. Cette aptitude, en plus de la libération totale des mains, constitue un avantage adaptatif important.

## Les outils

L'espèce humaine n'est pas la seule à utiliser des outils, mais elle est la seule à en fabriquer. Pour déterminer l'origine de cette activité, on s'appuie sur la datation des objets découverts dans les fouilles et sur les traces de découpe laissées par des outils sur des os fossiles.

De telles traces ont été identifiées en Éthiopie en 2009 et datées de 3,4 millions d'années.

Les plus anciens outils ont été découverts au Kenya en 2011 et datés de 3,3 millions d'années : 149 outils de pierre dont 83 nucléus, roches massives débitées pour obtenir des morceaux plus petits, mais aussi 35 éclats tranchants, 7 blocs ayant pu faire office d'enclume et d'autres pièces utilisables comme « marteaux ».



Outils de pierre sur le site Lomekwi (Kenya)

Avant ces découvertes, on pensait que les premiers outils de type oldowayen (galets aménagés) étaient l'œuvre d'Homo habilis (2,4 millions d'années).

Comme souvent, la découverte récente des outils de Lomekwi pose de nouvelles questions. Qui sont les fabricants de ces outils : Kenyanthropus platyops ? Australopithecus afarensis (Lucy) ? Malgré un cerveau de dimensions modestes (environ 500 cm<sup>3</sup>) ?

Questions sans réponse, pour l'instant.

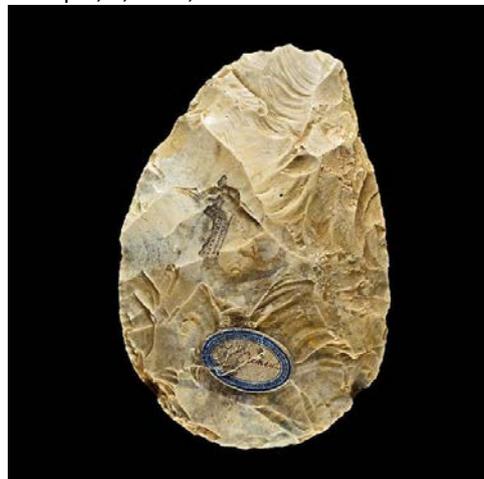


Galets aménagés, Éthiopie, 1,7 MA, œuvre d'Homo habilis.

Des outils beaucoup plus performants seront fabriqués par la suite. Le modèle le plus emblématique est le biface, caractéristique de la culture acheuléenne.

Ce nom provient de la commune de Saint-Acheul, dans la Somme, où ont été trouvés les premiers bifaces (image ci-contre) au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Les plus anciens bifaces proviennent du Kenya et sont datés de 1,76 MA. On ignore si leur auteur est Homo habilis ou Homo erectus qui cohabitaient dans la région à cette époque.



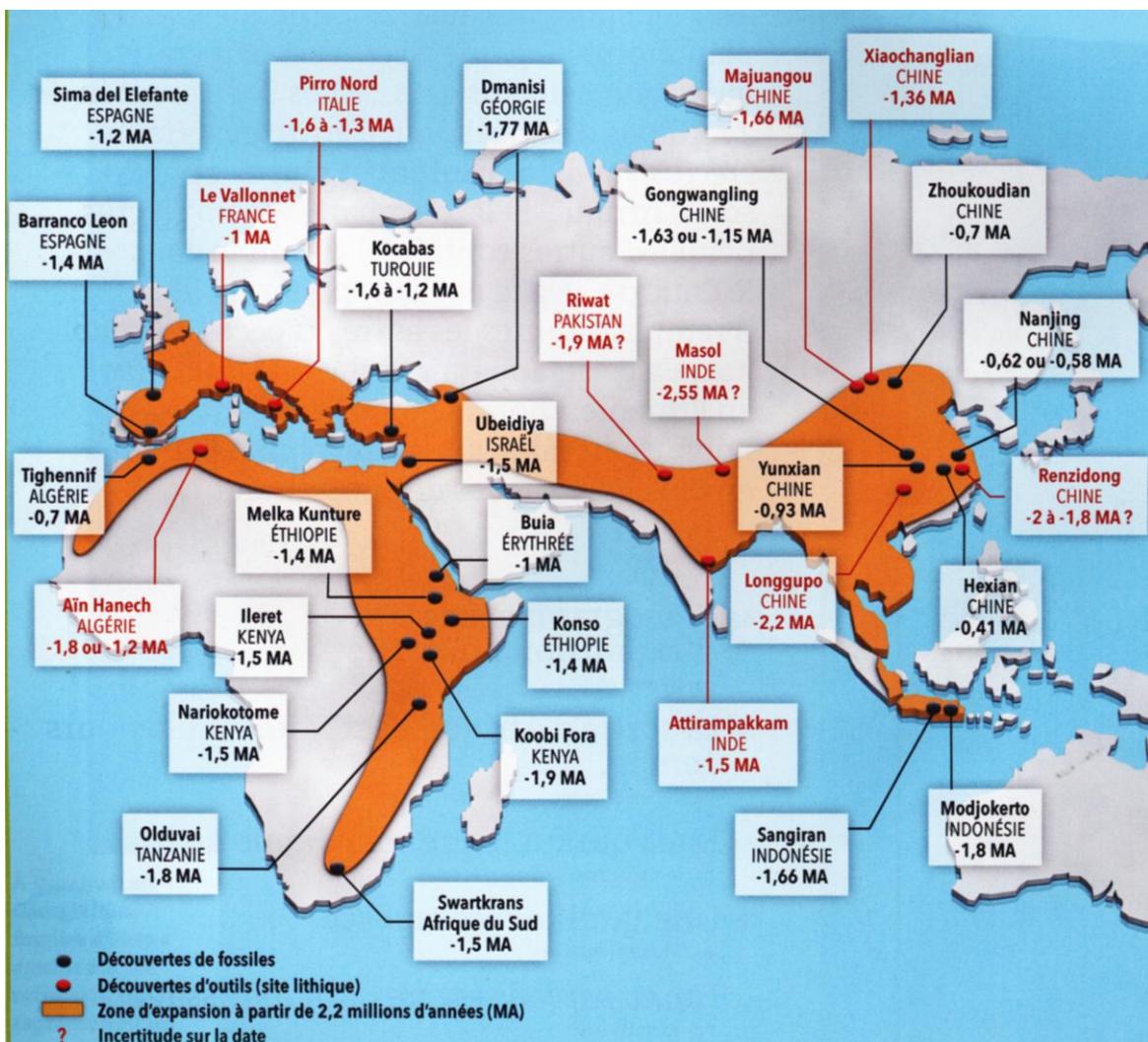
# Les sorties d'Afrique

## Première sortie

Les plus anciens fossiles de la lignée humaine trouvés hors du continent africain proviennent du site de Dmanisi, en Géorgie : cinq crânes d'**Homo erectus** datés avec une bonne précision de 1,77 million d'années.

Cette espèce apparue en Afrique vers 2 millions d'années possède une très bonne aptitude à la marche et un crâne dont le volume dépasse les 1000 cm<sup>3</sup> (1400 cm<sup>3</sup> pour l'homme actuel). C'est un prédateur redoutable si l'on en juge par les nombreux restes d'os animaux entaillés ou brisés retrouvés.

La carte ci-dessous montre les sites où l'on a découvert des fossiles d'**Homo erectus** ou des outils dont on lui attribue la fabrication.



Cette première sortie d'Afrique s'est faite en passant par la région du Sinaï.

La dispersion s'effectue ensuite vers l'est et l'ouest mais reste en-dessous du 40<sup>ème</sup> parallèle. **Homo erectus**, bien que très adaptable, préfère les régions chaudes.

Sa présence en Europe occidentale, au climat plus froid, est relativement tardive.

Homo erectus n'avait évidemment pas conscience qu'il changeait de continent. Ses déplacements sont très lents (20 kilomètres par siècle en moyenne). Les hypothèses de changement de climat ou de migrations des animaux chassés ne tiennent pas pour justifier cette sortie d'Afrique.

## Homo sapiens

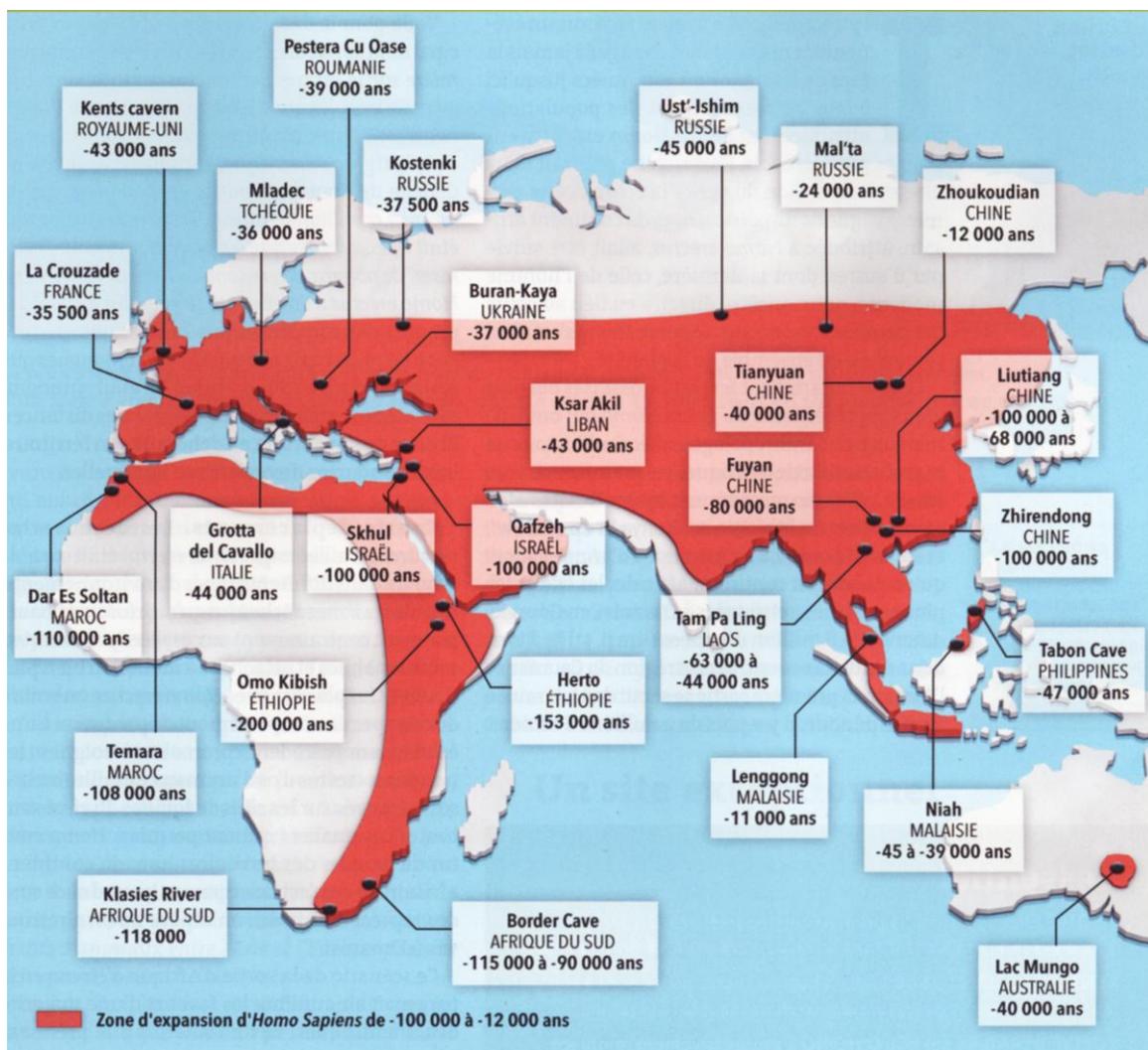
On dispose de très peu d'éléments sur l'évolution des Homo erectus africains conduisant à une nouvelle espèce, Homo sapiens. On s'accorde cependant sur l'origine africaine de l'homme moderne que l'on situe aux environ de 200 000 ans.

Une des différences essentielles entre Homo erectus et Homo sapiens est, chez ce dernier, la lente croissance des enfants qui a des conséquences importantes sur la plasticité du cerveau, l'apprentissage, le langage, la psychologie, l'organisation sociale, la reproduction...

## Deuxième sortie

La deuxième sortie d'Afrique est l'œuvre d'Homo sapiens.

La carte ci-dessous montre les sites où l'on a découvert des fossiles de cette espèce.



Vers 100 000 ans, Homo sapiens sort d'Afrique et remplace les populations existantes qui avaient évolué de façon indépendante. La plus connue de ces populations est le groupe des Néanderthaliens qui occupait l'Europe continentale. Le remplacement s'est effectué par pression démographique et par métissage.

L'analyse génétique nous apprend que, selon la région dans laquelle il vit, l'homme moderne possède entre 1,5 et 6% des gènes des hommes qu'il a remplacés.

## Autres questions

De très nombreux sujets très intéressants pourraient encore être abordés.

Quel est le détail du processus évolutif qui a permis l'émergence d'Homo sapiens ?

Sous quelle pression de sélection ?

Quelle est l'importance du phénomène de néoténie (naissance de bébé « prématuré » et allongement de l'enfance, donc de la période d'apprentissage) ?

Quel est le rôle du langage ?

Peut-il être relié à la fabrication des outils ?

Quel était le régime alimentaire de nos ancêtres ?

Quel rôle a joué la domestication du feu dans l'alimentation et l'évolution ?

Comment ont évolué les populations européennes et asiatiques après la première sortie d'Afrique ?

Comment ont-elles été remplacées par Homo sapiens ?

De quand date le culte des morts ?

Comment est apparu et a évolué la pensée symbolique ?

Y a-t-il un lien avec l'art figuratif ?

...

Des réponses existent à certaines de ces questions mais beaucoup d'entre elles sont très spéculatives.

Dans le chapitre suivant nous évoquons la question de l'existence de la vie ailleurs que sur la terre car la réponse à cette question a beaucoup évolué lors des dernières décennies.

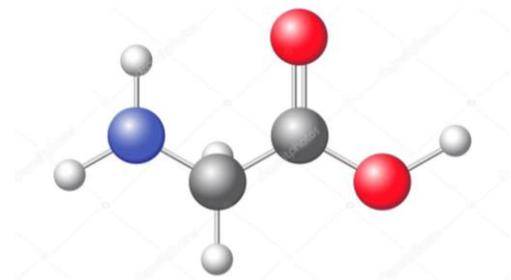
# Sommes-nous seuls dans l'univers ?

Depuis 1961, la réponse à cette question est donnée par l'équation de Drake. Le produit de 7 facteurs fournit le nombre de civilisations extraterrestres dans notre galaxie avec lesquelles nous pourrions entrer en contact !

Certains facteurs sont hautement spéculatifs, d'autres peuvent être estimés avec davantage de précision.

## Chimie interstellaire

Les observations du milieu interstellaire montrent sans ambiguïté l'existence de réactions chimiques nombreuses produisant des molécules organiques relativement complexes. Rappelons que la molécule de glycine, un des 22 acides aminés constituant les protéines terrestres, a été détecté sur la comète Rosetta.



La matière première constitutive de la vie existe donc déjà dans les matériaux qui vont constituer les planètes. Mais nous savons que le détail du passage de la chimie à la vie reste en grande partie inconnu, même si nous constatons qu'il s'est produit sur la Terre il y a environ 4 milliards d'années.

## Planètes et satellites du système solaire

Nous faisons l'hypothèse que l'apparition de la vie nécessite l'existence d'une planète rocheuse (non gazeuse) et la présence d'eau liquide donc une température de surface comprise entre 0 et 100°C.

A part la Terre, Mars a pu posséder au début de son existence des conditions favorables à la mise en œuvre d'une chimie prébiotique avancée. Les différents programmes d'exploration de cette planète n'en ont pas encore apporté la preuve. Mais les missions ExoMars et Mars 2020 vont se concentrer sur la recherche des traces éventuelles de la vie passée.

Europe, satellite de Jupiter, et Encelade, satellite de Saturne, possèdent vraisemblablement des océans souterrains qui pourraient abriter la vie mais cela reste très hypothétique et aucun programme d'exploration n'est prévu, ni même envisageable à ce jour.

## Exoplanètes

Il faut donc aller chercher ailleurs, c'est-à-dire sur les planètes gravitant autour d'autres étoiles.

La découverte de la première exoplanète date seulement de 1995. En 2018, le nombre d'exoplanètes découvertes depuis devrait dépasser 4000.

Les images ci-contre ne sont pas des photographies, mais des vues d'artiste.



Le satellite Kepler lancé en 2009 et tombé en panne en 2013 en a découvert 2800. Son successeur, TESS, a été lancé avec succès le 18 avril 2018. Selon la Nasa, il pourrait découvrir 20 000 exoplanètes, dont plusieurs centaines ayant une taille voisine de celle de la Terre.

De nouveaux appareillages laissent entrevoir la possibilité de faire l'analyse de l'atmosphère des exoplanètes les plus proches. La détection d'oxygène serait un indice très fort de la présence d'une vie proche de celle que nous connaissons sur terre.

Aujourd'hui, mon intime conviction est que la vie existe ailleurs dans l'univers. Probablement basée sur la chimie du carbone car des molécules organiques existent dans l'espace interstellaire. Impossible d'aller plus loin et de prédire des formes macroscopiques. L'évolution sur terre montre la très grande diversité des espèces ayant existé dans des environnements variables. Il ne peut qu'en être de même ailleurs, sous des formes inconnues sur Terre.

## Conclusion

Une conclusion est-elle vraiment nécessaire à cet opus destiné à mes petits-enfants ? L'exposé relativement bref que je viens de faire résume les connaissances et les interprétations qui sont les miennes sur un très vaste sujet. Il est obligatoirement parcellaire et subjectif.

Cette conclusion sera donc simplement une suite des idées développées en introduction concernant la place de la science dans notre réflexion et sur les tendances actuelles que je constate, parfois avec tristesse et effroi.

Au 21<sup>ème</sup> siècle, la science « décline » puisqu'elle n'est plus censée nous apporter le bonheur comme c'était le cas dans l'après guerre que j'ai connu dans ma jeunesse. L'avenir était alors radieux. Et les « progrès » ont été fantastiques, autant dans les connaissances fondamentales que dans la technologie. Une grande partie des informations qui figurent dans les pages qui précèdent étaient inconnues avant 1950. La technologie issue des découvertes fondamentales du 20<sup>ème</sup> siècle est répandue dans le monde entier, la plus spectaculaire d'entre elles étant la « révolution Internet ».

Pour le sujet qui nous occupe, elle m'a permis de vérifier rapidement les informations dont je n'étais pas absolument certain. La quasi-totalité des illustrations de ce document est un copier-coller des images en accès libre et pour lesquelles je n'ai même pas indiqué les sources.

La technologie actuelle permet la diffusion mondiale et instantanée de toute information, scientifique ou non (dont la fiabilité doit cependant être vérifiée). De nombreux sites de vulgarisation sont extrêmement bien faits et attrayants.

Malgré cela, on voit subsister ou progresser des idées en contradiction totale avec la connaissance scientifique du moment. Un grand mouvement anti-science, majoritairement issu des États-Unis, remet en cause les fondements même de la démarche scientifique.

Voilà ce que je lis sur Wikipedia à propos de l'anti-science :

*« L'anti-science est une position qui rejette la science comme l'ensemble des connaissances et de découvertes de la nature, et la méthode scientifique, dont font partie les principes intangibles de réfutabilité, de non-contradiction et de reproductibilité. »*

*Les personnes qui ont des opinions antiscientifiques n'acceptent pas que la science soit une méthode objective, ou que celle-ci génère la connaissance universelle. Elles soutiennent aussi que le réductionnisme scientifique, en particulier, est un moyen intrinsèquement limité pour atteindre la compréhension du monde complexe dans lequel nous vivons. Les partisans des anti-science critiquent également ce qu'ils perçoivent comme le privilège incontestable, la puissance et l'influence que la science semble exercer dans la société, l'industrie et la politique ; ils s'opposent alors à ce qu'ils considèrent comme une attitude arrogante ou un esprit fermé parmi les scientifiques. »*

Je n'aurais pas écrit mieux.

La liberté de penser doit évidemment être respectée.

Mais l'antiscience ne mène à rien sinon à un retour au créationnisme (lecture littérale de la Bible), au platisme (théorie selon la terre est plate) et par conséquent aux diverses théories du complot puisque les preuves scientifiques qui contredisent ces théories ne peuvent être que des mensonges, des trucages, des illusions d'optique...

La notion philosophique de vérité est débattue depuis l'antiquité sans qu'il soit possible de la définir de façon incontestable. La démarche scientifique telle que je l'ai présentée dans l'introduction ne conduit pas à des vérités absolues et éternelles mais à des résultats provisoirement vraisemblables.

Si l'antiscience était minoritaire dans le monde, je n'y accorderais pas la moindre importance. Mais une enquête à propos de la théorie de l'évolution réalisée en 2011 par IPSOS dans 24 pays dispersés sur tous les continents arrive au résultat suivant : 41% d'évolutionnistes, 28% de créationnistes et 31% sans opinion.

Aux États-Unis, la proportion atteint 78% de personnes qui adhèrent à l'idée d'une évolution guidée par Dieu d'une manière ou d'une autre.

Ceci nous conduit à une question morale : est-ce bien ou mal ?

Mais nous passons dans le domaine philosophique où mes compétences sont extrêmement réduites (et je le regrette). Je n'irai donc pas plus loin dans cette voie.

Pour conclure je livre mon intime conviction.

**La démarche scientifique telle qu'elle est encore pratiquée en ce début du 21<sup>ème</sup> siècle est probablement le meilleur moyen d'aborder l'étude d'un problème à caractère scientifique.**

**De plus, je pense que la connaissance scientifique, quelles que soient ses lacunes et ses imperfections, constitue un passage obligé à toute réflexion de type philosophique ou métaphysique sur la place occupée par l'homme sur Terre et dans l'Univers.**