

# L'origine cosmique de la vie

## Partie 1

par Laurent Gruel  
Ste Montaine 1998

### 1 Comment former une Terre aqueuse?

#### 1.1 L'origine du système solaire

##### 1.1.1 La synthèse des éléments

##### 1.1.2 La seconde génération d'étoiles

##### 1.1.3 la chimie des nuages

##### 1.1.4 Formation du Système Solaire

### 2 La vie : sources et cheminements

#### 2.1 L'apparition de la vie

#### 2.2 Caractéristiques de la vie

#### 2.3 A la recherche de notre ancêtre

#### 2.4 Évolution du message génétique

#### 2.5 Les voies de recherche

#### 2.6 L'épopée de la vie

#### 2.7 L'explosion du Cambrien

#### 2.8 Le choix

### **3 Un écosystème en interaction: impact sur l'évolution ➡**

#### 3.1 L'équilibre Soleil-Océan-Atmosphère

#### 3.2 Le chaos et la vie

#### 3.3 Les nouveaux départs de la vie: Soleil - Astéroïdes - Jupiter

### **4 L'origine des origines ➡**

### **5 Le Grand Comment: la question de l'anthropocentrisme ➡**

#### 5.1 La Question

#### 5.2 La grande corrélation

### **Annexe L'existence ou la structure du Monde ➡**

#### Références

### **1 Comment former une Terre aqueuse?**

#### **1.1 L'origine du système solaire**

##### **1.1.1 La synthèse des éléments**

Il nous faut comprendre comment l'évolution stellaire et interstellaire en effectuant la synthèse de tous les éléments chimiques allait ouvrir la possibilité de la chimie organique et conduire à l'éclosion de la vie.

Une étoile équilibre sa pression de radiation avec le poids des couches de gaz extérieurs. Lorsque le rayonnement diminue faute de combustible, le cœur de l'étoile se comprime, la température s'élève jusqu'à l'ignition par fusion d'un autre combustible.

L'équilibre caractérise la plus grande partie de la vie de l'étoile ce qui assure un rayonnement stationnaire.

La masse de l'étoile est le facteur qui détermine très largement sa vitesse d'évolution, ainsi que la profondeur dans la table de Mendeleiev de sa genèse nucléaire.

Une étoile 10 fois plus massive que le Soleil est 1000 fois plus lumineuse et évolue 100 fois plus vite: elle disparaîtra en 100 millions d'années.

Le diagramme constitué par les astronomes danois et américain, Hertzsprung et Russel indique les luminosités des étoiles en fonction de leur température superficielle.

Tant qu'elles transforment l'hydrogène en hélium, les étoiles se situent sur la séquence principale. Elles bifurquent ensuite dans la synthèse successive de nouveaux éléments par contraction/ échauffement du coeur, ce qui dilate les couches périphériques et les transforme l'étoile en géante rouge.

La principale contribution à la synthèse des éléments chimiques est celle des étoiles les plus massives (30 masses solaires et au-delà).

Au départ un nuage de 10 à 100 000 masses solaires se fragmente identiquement à toutes les échelles, formant des nodules nebulaires. La naissance des étoiles commence par l'effondrement de ces nodules nebulaires.

Au centre de chaque fragment, une petite protoétoile se forme autour de laquelle gravite un large tourbillon de gaz, entraînant avec lui une large fraction du moment angulaire.

Considérons la situation de l'une de ces étoiles massives.

Le tourbillon aboutit à un disque d'accrétion qui tombe sur la protoétoile et lui fournit 30 masses solaires en une dizaine de millions d'années.

Cette étoile de première génération est essentiellement constituée d'hydrogène et d'hélium, la synthèse des métaux n'étant pas entamée.

L'étoile centrale se comprime et un plasma séparant les noyaux d'hydrogène et d'hélium de leurs électrons se forme à 50 000 K. Lorsque le centre atteint 40 millions de K, les noyaux d'hydrogène (les protons) ont acquis une vitesse suffisamment élevée pour vaincre la barrière de répulsion électrostatique. En se rapprochant à une distance équivalente à leur diamètre apparent, ils sont soumis à la force nucléaire attractive. Cette force est à très faible portée car elle est vectorisée par des porteurs de charge à brève existence. Cette force soude la paire de protons qui se transforme en un couple proton-neutron, en expulsant un anti-électron, qui demeure dans le plasma jusqu'à annihilation avec un électron, et un neutrino qui sort de l'étoile car il n'interagit que trop faiblement avec les autres particules.

Le deutérium ainsi formé va rencontrer un autre proton formant de l'hélium 3. La rencontre de 2 noyaux d'hélium aboutit à l'hélium 4 stable.

Au terme de 60 millions d'années, le coeur a consommé tout son combustible. L'étoile s'effondre à la recherche d'un nouvel équilibre. La température d'ignition de l'hélium est atteinte afin de permettre la fusion simultanée de 3 noyaux d'hélium pour former du carbone. La contraction lente du noyau lui fait atteindre 400 millions de K et l'échauffement des couches intermédiaires à 40 millions de K provoque le démarrage de la fusion de l'hydrogène autour du noyau: la structure en couche d'ignitions se met en place.

Les couches extérieures gonflent par pression de radiation et le diamètre de l'étoile est multiplié par 100.

La fusion du carbone et de l'hélium vers 400 à 500 millions de K engendre l'oxygène. Le néon et le magnésium apparaissent vers 600 millions de K.

Mais le principe d'exclusion de Pauli entre les électrons, qui les empêchent de prendre le même état quantique qu'un état déjà occupé bloque leur compression: la température ne peut plus s'ajuster et la fusion du carbone devient explosive; les éléments principaux jusqu'au fer sont produits rapidement. L'étoile a produit les 7 éléments constituant 99,9% de la matière dans l'univers.

Mais la dernière synthèse est destructive. En effet l'énergie des photons leur permet de détruire les noyaux de fer qui viennent d'être synthétisés et les scindent en noyaux d'hélium. La réaction consomme de l'énergie et l'étoile s'effondre mais l'impossibilité de la compression du coeur provoque le rebond des couches externes sur le noyau: l'étoile explose en supernovae. La fusion des électrons du plasma avec

les protons produisent une vague de neutron qui accompagnent l'onde de choc. Les protons et neutrons propulsés vont par fusion avec les éléments déjà formés génèrent tous les autres éléments du tableau de Mendeleïev. Dans le cas d'une capture rapide de neutrons, les noyaux en capturent plusieurs simultanément ce qui leur permet de sauter directement vers un autre noyau stable. Dans le cas d'une capture lente, les noyaux ont le temps par désintégration bêta de retomber vers un élément stable plus simple.

Quant aux captures de protons, elles comblent les lacunes des éléments qui n'ont pas été formés par ailleurs.

Mais la seule énergie de l'onde de choc est insuffisante pour expliquer l'expulsion dans l'espace de la majeure partie de l'étoile. Les neutrinos émis lors de la formation des neutrons lors de l'absorption des électrons par les protons vont, par leur densité et par un effet de second souffle, entraîner la vague explosive dans l'espace.

### 1.1.2 La seconde génération d'étoiles ↑

L'ensemencement du milieu interstellaire par le carbone permet aux générations suivantes d'étoiles d'accélérer les processus de fusion de l'hydrogène par un phénomène de catalyse.

Les étoiles massives consomment leur combustibles dès 10 à 15 millions de K et n'ont pas besoin d'atteindre les 40 millions de K de la première génération..

Le cycle de catalyse est constitué par un carbone qui absorbe un proton formant l'azote 13 qui se désintègre en carbone 13. Celui-ci passe à l'azote 14 par une nouvelle absorption. L'azote 14 absorbe encore un autre proton pour former l'oxygène qui se désintègre en azote 15. Par une dernière absorption celui-ci se désintègre en un noyau de carbone et ... en un noyau d'hélium.

### 1.1.3 la chimie des nuages ↑

Plus la masse de l'étoile est élevée plus le rapport oxygène/ carbone s'accroît.. Lors de l'éjection de ces éléments par le vent interstellaire ou par un phénomène de novae ou supernovae, le gaz se refroidit formant l'oxyde de carbone (CO) très stable. La bulle de gaz gardera en excès du carbone ou d'oxygène; elle sera réductrice ou oxydante.

Composition des nuages: 70% H, 28% He, 0,3 % de CO, 0,7 de O, 0,2 N, 0,1 Fe, 0,05% Mg et 0,5 Si.

0,2% d'oxygène oxyde les métaux et les 0,5% restant forment de la vapeur d'eau.

La température chutant, les oxydes forment des silicates surtout de fer et de magnésium. Puis les silicates se condensent en grain ultramicroscopique de 0,1 micron recouvert d'une pellicule de givre.

Les étoiles de masses inférieures à 20 Mo dégagent plus de carbone que d'oxygène dans les bulles gazeuses résultant de leur explosion en supernovae. En conséquence, la bulle réductrice en expansion contiendra surtout du CO suivi de CN et CH. Et la première molécule triatomique ne sera plus H<sub>2</sub>O mais HCN (acide cyanhydrique) Des grains de fer métallique se condenseront au côté de grains de graphite et de diamant. Les grains sont recouverts d'un givre d'hydrocarbure incluant des composés organiques.

Les énormes bulles vont continuer à se former tout au long des 10 milliards d'années précédant la création de notre Système. La multiplicité des étoiles de masses réduites contribue au processus de formation des nébuleuses planétaires (couches externes s'échappant par les turbulences du vent stellaire d'une géante rouge à l'atmosphère distendue. Les millions de bulles couvrent toute la gamme du fortement réducteur au fortement oxydant. Elles vont s'interpénétrer dans les nuages interstellaires s'accumulant le long des bras galactiques où les ondes de densité provoquent la condensation des étoiles de grandes masses. Les nuages forment 10% de la masse galactique et possèdent des dimensions de 10 à 100 A.-L., leur densité passant de quelques particules à des millions par cm<sup>3</sup>.

Dans les nuages denses on a identifié quelques 80 espèces de molécules différentes par leur spectre d'émission. Parmi elles, 60 sont organiques.

La densité restant très faible, les collisions sont rares et les molécules doivent se former à la surface des grains solides qui ont une double fonction de substrat et d'apport de catalyseur.

La source énergie est le rayonnement ultraviolet des étoiles qui ionise l'hélium. Cet hélium collisionne les molécules et provoque une cascade d'ionisation.

Il reste à noter que toutes les molécules prébiotiques et notamment H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>CO ( formaldéhyde) et HCN sont présentes abondamment partout dans la Galaxie.

#### 1.1.4 Formation du Système Solaire ↑

Les météorites primitives dites chondrites possèdent les mêmes rapports d'abondance entre les éléments non volatils (dits " métaux ") que le Soleil. Les éléments volatils ne sont absents que des météorites formées dans des régions trop chaudes pour les retenir.

Ces chondrites sont composées de grains agglomérés, sédimentés à froid et qui ne sont pas en équilibre chimique: le totalement oxydé côtoie le totalement réduit, le réfractaire côtoie le volatil et l'altère par l'eau côtoie l'anhydride.

L'origine des grains est multiple car plusieurs étoiles ont contribué à leur synthèse mais leurs sédimentations résultent de la séparation des gaz et des poussières lors de l'arrêt de l'effondrement du nuage interstellaire sur le disque protosolaire. Cette séparation arrête les turbulences et bloque finalement la sédimentation.

411 composés organiques ont été identifiés par exemple dans la chondrite carbonée de 1969 trouvée à Murchison, Australie.

Parmi les 74 acides aminés trouvés, 8 sont utilisés dans les protéines. Toutes les purines trouvées sont utilisées comme lettres codeuses dans l'ADN transcripteur et l'ARN messager du vivant.

De même l'analyse par spectroscopie en temps réel des poussières recueillies lors du passage dans la queue de la comète de Halley a permis d'identifier des anomalies isotopiques et ont conduit à supposer 4 origines stellaires distinctes pour ces poussières cométaires.

Dans le Soleil le rapport C/O est de 1 pour 3, ce rapport est recoupe par l'analyse des météorites carbonées en général oxydées mais contenant une forte proportion de grains de fer métallique ( donc réduit). Cette abondance est la même dans la comète de Halley.

En résumé le Système Solaire a été formé voici 4,5 milliards d'années à partir d'un nuage moléculaire situé dans un bras spiral enrichi de multiples composés organiques (contenant C,N,O,S) produits par les nombreuses étoiles des premières générations. Ces poussières étaient essentiellement constituées de silicates recouvert d'une pellicule de glace d'eau mais aussi du givre de composés organiques volatils.

Au sein de ce nuage moléculaire géant, les grumeaux présents ont toutes les tailles révélant un processus invariant d'échelle. Peu à peu les grumeaux les plus massifs s'effondrent et forment des étoiles de 50 à 60 Masses solaires. Au bout de quelques millions d'années, elles explosent en supernovae. Les bulles chaudes et oxydantes se propagent sous forme d'une onde de choc et provoquent l'effondrement de centaines de grumeaux moins massifs dont un nodule d'environ 1 masse solaire: notre Soleil et son futur Système.

##### 1.1.4.1 Le disque d'accrétion

Le module s'effondre mais la conservation du moment angulaire entretient et renforce les turbulences en son sein et seule 5 à 10% de la masse prend une forme sphérique, le reste s'aplatit en un large disque. Par friction, la matière des zones internes est freinée et tombe vers le cœur ce qui alimente le Soleil et lui apporte toute sa masse

La matière des zones extérieures est accélérée et en élargit les anneaux en emportant le moment angulaire.

100 000 ans se sont écoulés depuis le début de l'effondrement.

Le nodule nébulaire termine son effondrement, les turbulences diminuent et les poussières sédimentent. Les chondrites non différenciées venant de petits astéroïdes témoignent de cet amalgame. La séparation entre le gaz et les poussières ne prend que quelques milliers d'années. Ceci peut être pris par convention comme l'instant zéro du Système Solaire, instant que l'âge radioactif des chondrites fait remonter à 4,56 milliards d'années.

#### 1.1.4.2 Formation des planetisimales

Les poussières tournent en orbite autour du nodule central mais sont attirées par le disque et tombent perpendiculairement. Leur oscillation est rapidement amortie par la turbulence.

La turbulence résiduelle ralentit l'agrégation des poussières mais moins de 100 000 ans sont nécessaires pour l'apparition d'objet de 1 à 10 kilomètres qui vont tourner en de gigantesques anneaux autour du Soleil. La substance des planetisimales change avec l'éloignement au Soleil mais dans la zone des planètes terrestres la température est de l'ordre de 1000 K; les particules de silicates sont totalement déshydratées et les volatils sont dégazés.

Mais à partir d'une distance de 5,2 U.A. (distance Soleil- Jupiter) le givre superficiel ne se vaporise plus en dépit de la rareté du gaz qui entoure les grains. Les planetisimales contiennent de grandes quantités de neige d'eau: ce sont les noyaux des comètes primitives.

Pendant ce temps le protosoleil est 5 fois plus brillant qu'aujourd'hui car malgré une température superficielle plus faible (4000 K au lieu de 5800K ) sa surface est 20 fois plus grande.

Sa vitesse de rotation trop élevée lui fait éjecter un anneau gazeux équatorial qui percute le disque d'accrétion, mécanisme par lequel la croissance du Soleil est stoppée. Le gaz est infléchi par le champ magnétique de l'étoile et s'échappe par les pôles (objets de Herbig-Haro). L'onde de choc avec le disque d'accrétion souffle complètement les résidus gazeux et les fines poussières du disque en 2 à 3 millions d'années.

Seules sont épargnées les planetisimales de plus de  $10^{16}$  kg déjà acréteées avant ce vent dit de " T-Tauri " ( selon la première étoile de ce type identifiée).

D'innombrables collisions de planetisimales qui tournent dans le même sens sur des orbites proches aboutissent à une distribution de masse qui est à nouveau invariant à toutes les échelles.

Dans l'étape finale, l'attraction des objets n'étant plus négligeable, la croissance des objets massifs s'emballe tandis que les plus petits objets subissent des collisions plus violentes et se fragmentent.

Au-delà de la zone du disque à 450 K (zone des planètes terrestres) , les silicates et les grains de fer qui forment 0,3 % de la masse du gaz.

Par contre à 5,2 U.A. (Jupiter) la glace d'eau alourdit les grains et la phase solide constitue 1,8% de la masse du gaz. En outre les éléments volatils évaporés des grains diffusent de la zone interne vers l'extérieur et se condensent sur la paroi froide à 5,2 U.A.

Au lieu d'un coeur de 1 masses terrestres, le coeur de Jupiter est au départ d'environ 10 masses terrestres. En outre les planetisimales de la zone ( ce sont des comètes) sont absorbées tout comme l'a été en 1994 celle de Shoemaker-Levy et le noyau de Jupiter est en fait de 29 masses terrestres. Cela lui permet d'accumuler rapidement les quelques 300 masses équivalent terrestres de gaz qui l'entourne.

Jupiter par son attraction va éjecter une large part des planetisimales glacées en dehors du Système Solaire.

Une fraction substituera dans la sphère de Oort d'un diamètre supérieur à 1 A.-L.

Quelques millions ( ce qui est une fraction très réduite) se stabilise dans la ceinture de Kuiper par résonance avec Neptune.

Un grand nombre de ces comètes perturbent la ceinture astéroïdes pendant leur éjection: les collisions entre astéroïdes se feront à plus grande vitesse empêchant la formation d'une planète et perturbant fortement la croissance de Mars (celui-ci ne fait que 10% de la Terre).

Elles vont aussi bombarder la Terre, détruire son atmosphère primitive et retarder la stabilisation de son climat.

Les 4 planètes telluriques résultent de la collisions d'une vingtaine d'objets de la taille de Mars. L'excentricité de l'orbite de ces objets étant modifiée par Jupiter qui favorise leur collision.

Après 40 millions d'années, la Terre est formée, ses composés volatils s'évaporent en raison des

collisions.

Seuls subsistent 2 ou 3 objets de la Taille de Mars sur des orbites instables. L'un allait des percuter avec Mercure pour lui faire perdre sa croûte silicate.

L'autre allait percuter la Terre pour former la Lune. Le temps relevé par l'âge radioactive des roches lunaires est 130 millions d'années après la sédimentation des poussières.

#### 1.1.4.3 Agglomération de la Terre

L'énergie cinétique dégagée lors d'un impact croît avec le carré de la vitesse, la vitesse étant proportionnelle au rayon de l'objet attracteur. L'énergie et la température croît donc avec le carré du rayon: la surface réchauffe l'intérieur. Peu à peu, le centre de la Terre se liquéfie: le fer, déjà réduit sous forme métallique dans l'espace, forme un noyau central sur lequel flottent les silicates. La radioactivité de l'uranium, produit par les supernovae, va entretenir cette chaleur.

#### 1.1.4.4 Formation des océans et de l'atmosphère

La répartition des isotopes des gaz inertes (nobles) dans l'atmosphère tels que le xénon ou le krypton est incompatible avec leur appartenance avec une atmosphère primitive; ils ont été apporté par une source qui les ont séparés avant leur arrivée sur Terre. Les clathrates (les hydrates d'eau présents dans les comètes) ont pu jouer le rôle de chambre de stockage et de séparateur à froid des différents isotopes.

De même le taux de deutérium dans les océans correspond au taux de formation dans la zone d'accrétion des comètes dans la région de Jupiter. Il correspond au taux obtenue par condensation de l'eau à 200 K. La molécule d'eau sous ses 2 isotopes H<sub>2</sub>O et HDO se condensent sous forme de neige qui peut alors se refroidir à plus basse température. Ceci indique comment la neige des comètes s'est condensée et aboutit à une origine cométaire pour les océans.

Il est parfois avancé que les océans seraient formés à 3/4 d'eau provenant des chondrites, le quart restant ayant été apporté par les comètes. Or les bombardement par astéroïdes deviennent négligeables statistiquement après 200 millions d'années au contraire des bombardement cométaires qui se poursuivent et évacuent dans l'espace l'atmosphère des origines surchauffée et saturée de vapeur d'eau avant même que les premiers océans se soient condensées.

Le bombardement qui a permis la constitution des océans actuels a été essentiellement le fait de comètes de 5 à 500 km venant de la zone des planètes géantes et dont l'orbite avait été perturbée par leurs croissances. Elles nous ont apporté 10 fois plus d'eau qu'il n'en demeure et 1000 fois plus de gaz qu'il n'en demeure aujourd'hui. Ce phénomène semble fournir la quantité de carbone constatée aujourd'hui.

Le bombardement a eu pour effet de provoquer la disparition des matériaux volatils.

Ceci explique la quantité des matériaux proches du fer présents dans la croûte terrestre.

En fait le bombardement cométaire se poursuit sous la forme des poussières de 1 micron venant de la lumière zodiacale. On estime à 10<sup>18</sup> tonnes la quantité de matière organiques déposée par les comètes et leurs poussières depuis le début de la Terre.

Les radioastronomes ont pu identifier 83 molécules organiques différentes (construite à partir de carbone et d'hydrogène).

Les météorites et comètes ont pu en apporter une grande quantité sur Terre.

Environ 80% des grains d'origine cométaire contiennent de la matière organique et n'ont pas fondu dans l'atmosphère. Ce qui correspond à 100 fois la quantité de carbone actuellement recyclé par la biomasse.

En outre tous les acides amines sont homochiraux ; ils sont orientés vers la gauche .

Cette particularité n'a pratiquement été observée que sur Terre.

Or l'explication actuellement avancée est liée à la polarité des rayonnement stellaires qui aurait détruit les formes droites.

Voici 4 milliards d'années, la Lune était au moins 6 fois plus proche qu'aujourd'hui et les marées 30 fois plus fortes. La durée du jour était d'une dizaine d'heures.

L'atmosphère était près de 60 fois plus dense et le soleil 30% moins brillant.

Notre atmosphère a 2 sources dont les parts respectives varient suivant les auteurs:

-le dégazage du manteau terrestre

-les comètes

Il semble se dégager qu'une large fraction de l'atmosphère provient du dégazage du manteau terrestre, dégazage qui se poursuit de façon réduite, à voir les panaches trouvées au Galapagos et dans le Pacifique Est.

Ce dégazage à partir des volcans aurait, si le manteau terrestre était très réducteur, éjecté une proportion importante de méthane qui, dispersé dans la haute atmosphère sous forme d'aérosols organiques, aurait protégé une faible fraction d'ammoniac (1/100 000 dans une atmosphère de 1 bar). Cet ammoniac aurait contribué à l'élaboration de la chimie prébiotique et la formation des acides aminés. Les ingrédients auraient été fournis probablement par les comètes ou par les événements hydrothermaux des fonds océaniques.

Le problème est que les modèles actuels n'envisagent pas un manteau primitif assez réducteur pour produire la bonne quantité de méthane.

Dans un second temps une atmosphère beaucoup plus oxydante à base de CO<sub>2</sub> de 1 à 10 bars aurait suffi à maintenir la Terre sous effet de serre. Cet effet de serre était indispensable car le Soleil était alors 30% moins lumineux qu'aujourd'hui et sans lui la Terre n'aurait connu que des froids sibériens.

Le CO<sub>2</sub> aurait lentement régressé parallèlement au glissement du Soleil sur la séquence principale et à l'augmentation de sa température superficielle.

Le volcanisme aurait été indispensable au recyclage continu du carbone car sans lui le gaz carbonique aurait précipité en seulement 400 000 ans et l'effet de serre aurait disparu.

L'autre fraction de l'atmosphère vient donc des comètes

80% de la masse des comètes est constituée d'une partie volatile qui a donc enrichi notre atmosphère. La vapeur d'eau s'est condensée en océans dès que la Terre est passée sous son point d'ébullition (230 Celsius sous 30 atmosphères).

Dans la fraction restante des comètes, on trouve du formaldéhyde qui aurait polymérisé grâce aux ultraviolets solaires et formé une brume de particules solide dans la stratosphère. L'ammoniac est dissocié en azote et en hydrogène, celui-ci s'échappe car à ces températures, sa vitesse d'agitation est très supérieure à la vitesse de libération terrestre.

La température tombe à 100 Celsius.

La composition de l'atmosphère: 80% de CO<sub>2</sub>, 10% de méthane, 5% d'oxyde de carbone et 5% d'azote N<sub>2</sub>.

Les pluies acidifiées par le CO<sub>2</sub> attaquent les silicates. Les carbonates formés constituent des sédiments solides qui enterrent le CO<sub>2</sub>. La pression chute à 5 bars.

L'atmosphère terrestre est d'abord restée dans un état intermédiaire d'oxydoréduction pendant les premières 500 millions d'années, grâce à l'apport continu du gaz des comètes.

La grande quantité initiale de CO<sub>2</sub> et la contribution réduite de N<sub>2</sub> se sont imposées comme constituants majeurs. Le CO<sub>2</sub> a disparu dans les roches calcaires (qui a elles seules contiennent l'équivalent de 20 atmosphères) et l'azote, inerte géochimique, s'est accumulé au cours du temps et constitue aujourd'hui la majeure partie d'une atmosphère à la pression réduite.

Les gaz réducteurs se sont photodissociés sous les ultraviolets solaires ou oxydés par la petite quantité d'oxygène libérée par la photodissociation de l'eau. Peu à peu l'atmosphère va s'enrichir en oxygène grâce à la photosynthèse des cyanobactéries (les premiers 5%), puis par les algues (environ 12%), et enfin par les plantes(4%) pour atteindre 21% de la pression partielle atmosphérique.

Les principaux impacts cométaires s'accompagnent du bouillonnement des océans et conduisent à de fantastiques éjections d'eau et de gaz vers l'espace. De terribles ouragans se déchaînent et perturbent violemment toute la surface terrestre. Ces phénomènes se réduisent fortement voici 3,5 milliards d'années.

Mais la vie dans de si terribles conditions fourmillent déjà sous une forme cellulaire dans l'eau chaude des premiers océans.

## 2 La vie : sources et cheminements ↑

### 2.1 L'apparition de la vie

Toutes les formes de vie terrestre ont une origine commune. Elles possèdent toutes les mêmes proportions d'atomes: 62% d'hydrogène, 27 % d'oxygène, 8% de carbone, 2% d'azote, 1 pour mille de phosphore, 1 pour mille de soufre, des traces de fer pour le sang des animaux, de calcium pour les os des vertébrés et des traces de magnésium pour la chlorophylle.

Les atomes sont rassemblés en molécules.

Toutes les formes de vie sont composés de 80% d'eau, rappel de l'origine aquatique.

Les autres molécules sont les 20 acides aminés rattachés en de longues chaînes: les protéines.

Seul l'ordonnement des acides aminés dans les protéines les différencient.

Les protéines se distinguent en 2 groupes: les structurelles qui constituent les organismes et les enzymes qui choisissent et orientent les réactions chimiques.

L'assemblage des acides aminés pour constituer les protéines suit la codification imposée par les maillons de l'acide nucléique (ADN et ARN). Cet acide nucléique est formé de molécules différentes des acides aminés: il s'agit de 4 molécules: 2 purines et de 2 pyrimidines. Toutes deux ne sont que des combinaisons particulières d'hydrogène, oxygène, carbone et azote.

Entre l'ADN source du codage des protéines et l'ARN support pour leur constitution il n'existe qu'une seule variation dans ces 4 molécules

La vie est donc basée sur 30 molécules: 20 acides aminés, plus les purines et pyrimidines servant au codage nucléique, et des molécules moins fondamentales pour l'apparition du vivant (phosphate, sucre et lipides).

Or toutes ces molécules nécessaires à la vie peuvent être produites à partir d'eau, d'ammoniac  $\text{NH}_3$  ou d'acide cyanhydrique  $\text{HCN}$  pour l'azote, de méthane  $\text{CH}_4$  ou de formaldéhyde  $\text{H}_2\text{CO}$  pour le carbone.

La synthèse de ces briques élémentaires dans les molécules de la vie semblent impossible sur Terre car l'atmosphère n'était pas réductrice au contraire de ce que supposaient initialement Urey et Miller.

Mais toutes ces molécules de base sont présentes dans les nuages moléculaires où une lente synthèse à basse température se produit. Quels en ont donc été les vecteurs vers la Terre?

Ces éléments sont présents dans les chondrites carbonées protégées de la fusion par leurs couches superficielles.

Ils ont aussi été détectés dans les chevelures cométaires. L'apport des briques de la vie datent de l'accrétion hétérogène aux premiers âges de la Terre.

Il apparaît que les bombardements météoritiques voici 4 milliards d'années ont porté la croûte terrestre à la température de fusion en détruisant périodiquement toute tentative de développement de la vie. Celle-ci n'a pu enfin se stabiliser qu'après la fin du bombardement massif voici 3,8 milliards d'années.

Le dépôt des poussières retombant des impact cométaires dans des bulles d'écume à la surface des océans forme le premier support envisageable pour la formation des premières parois cellulaires.

Une autre possibilité est le dépôt de poussières dans des fonds argileux contenant des grains de

montmorillonite favorables comme premier site. Ces dépôts se seraient formés dans des lagons ou dans de grands lacs subissant le phénomène des marées.

## Composition

	Bactéries	Mammifères	Givre interstellaire	Fraction volatile des comètes
Hydrogène	63,1 %	61	55	56
Oxygène	29,0 %	26	30	31
Carbone	6,4 %	10,5	13	10
Azote	1,4 %	2,4	1	2,7
Soufre	0,06	0,13	0,8	0,3
Phosphore	0,12	0,13	0	0
Calcium	0	0,23	0	0

La vie ressemble moins à la Terre (silicate des rochers) qu'à la matière interstellaire.

Le calcium est uniquement nécessaire aux animaux (coquilles, squelette).

Le phosphore a été concentré dans les premières cellules probablement parce que les phosphates ont apporté de l'énergie avant l'invention de la photosynthèse par les algues bleues.

## 2.2 Caractéristiques de la vie ↑

Un organisme est vivant s'il peut se reproduire et évoluer.

La structure qui permet de stabiliser la série de réaction nécessaire est la cellule; la base du vivant.

Son confinement par rapport au milieu extérieur est assurée par une membrane semi-perméable qui filtre les molécules en entrée et en sortie et maintient le milieu interne dans un état stationnaire mais loin de l'équilibre thermochimique.

Sa stabilité est assurée par des rétroactions négatives qui lui apportent une autonomie partielle de l'environnement.

Les substances sont apportées de l'extérieur (nourriture), l'énergie est apportée par le métabolisme et transformée en chaleur et en action, les produits non utiles des réactions sont évacués.

## 2.3 A la recherche de notre ancêtre ↑

Nous sommes constitués d'eucaryotes c'est à dire de cellule à noyau.

Les corps de Golgi (qui emmagasinent les produits du métabolisme), les mitochondries (qui fournissent l'énergie

à partir de l'adenosynetriphosphate ou ATP) et les chloroplastes (producteurs de chlorophylle pour les algues et les plantes) sont d'anciennes bactéries qui ont fusionnées avec l'eucaryote primitif.

Le patrimoine génétique à base d'ADN est lui-même protégé par un noyau.

Au contraire, les procaryotes (archéobactéries et bactéries) ne sont que de petites cellules où l'ADN flotte librement

La découverte des archéobactéries thermophiles a pu les faire apparaître un moment comme nos ancêtres. Or cela ne cadre pas avec l'hypothèse plus probable d'organismes primordiaux basée sur l'ARN et non sur l'ADN.

Apparemment les bactéries et les archeobactéries forment deux familles distinctes et non pas originelle de notre propre famille les Eucaryotes. Notre ancêtre, le LUCA (Last Common Ancestor), serait commun aux trois familles.

Les eucaryotes ne peuvent survivre au delà de 60C, les bactéries de 95C mais certaines archeobactéries peuvent résister à 110C.

Or les bactéries dont les mécanismes cellulaires semblent particulièrement efficaces, ne semblent pas avoir pu donner naissance à des mécanismes beaucoup plus complexes présents chez les eucaryotes, tels l'épissage (mécanisme utilisés pour la transcription des gènes, assemblages des régions codantes ou exons et élimination des régions non codantes ou introns).

Les mécanismes moléculaires eucaryotes font penser au résultat d'un bricolage artisanal qui aurait précéder les procédés efficaces mais raffiné des procaryotes ( bactéries et archeobactéries).

Or les briques de l'ADN (les desoxyribonucleotides) sont produites à partir des précurseurs de l'ARN ( les ribonucléotides).

L'ARN a du inventer les protéines car la formation qui associe les acides amines entre eux dans les protéines est encore réalisée dans les cellules actuelles par une enzyme constitué d'ARN, un ribozyme (catalyseur ressemblant aux enzymes à base d'ADN). En fait l'ARN comme l'ADN peut transmettre de l'information et catalyser les réactions chimiques comme les protéines.

Or les organismes à base d'ADN sont aisément thermophiles si les éventuelles cassures sont évitées par un milieu à forte concentration de sel ce qui n'est pas le cas des organismes à base d'ARN, cette concentration de sel y accélérant les cassures. Les premiers organismes à base d'ARN seraient donc plutôt thermophobes et donc différents des archeobactéries.

En fait la vie n'a pas due au départ se développer dans des bouilloires à haute températures en présence de la bonne concentration de magnésium pour éviter la destruction de l'ARN.

La vie a du attendre l'invention de l'ADN pour se développer dans des milieux à haute température.

Le LUCA devait s'être développé dans un environnement modéré de 20 à 50C..

Il devait être plus proche des eucaryotes que des procaryotes et possédait comme eux des mécanismes séparés pour la transcription et la traduction,. L'adaptation aux températures élevées a entraîné le couplage entre les 2 mécanismes, une réduction de la taille du génome et une augmentation de la rapidité des réactions cellulaires: la thermoréduction.

En outre une enzyme connue, la reverse gyrase, nécessaire pour renfoncer les liens entre les 2 brins de l'ADN dans toutes les bactéries et archeobactéries thermophile aujourd'hui connu n'a été constituée que tardivement dans l'évolution car elle est le produit de la fusion de deux enzymes plus primitives.

Et il n'existe aucun eucaryote thermophile connu!

Les thermophiles ne sont donc pas des organismes archaïques mais modernes.

Il apparaîtrait également que la thermophilie des bactéries est une adaptation récente qui se serait produite plusieurs fois et indépendamment dans cette famille.

En outre il existe des archeobactéries psychrophile c'est à dire aimant le froid!

En fait il faut perdre de vue la vision primitive et darwinienne de l'évolution comme un processus visant à l'adaptation dans la complexification.

La vie est opportuniste; elle utilise des ressources utilisables mais non prévues à cet effet et elle peut adopter la simplification plutôt que la complexification pour sa survie.

La présence fortuite chez les archeobactéries vivant dans le froid de lipides permettant la résistance à haute température pourrait être vue comme une illustration de cet opportunisme. A l'heure actuelle il n'est pas possible de trancher entre une origine chaude ou froide des archeobactéries.

On peut imaginer que les procaryotes soient issus des eucaryotes par thermoréduction produisant d'abord la création des archeobactéries thermophiles, que les bactéries soient une dérivée d'une lignée particulière

des archeobactéries, celles vivant dans le froid et que l'adaptation à la thermophilie des bactéries se soient faites dans un second temps.

D'autres scénarios de création des eucaryotes reposent sur la fusion d'une bactérie et d'une archeobactérie.

Et, même si la vie est apparue à haute température, elle a dû se développer à basse température seule compatible du développement du monde basé sur l'ARN.

Les bactéries posséderaient une masse totale proche de la masse de l'ensemble des plantes terrestres qui ne sont responsables que de la photosynthèse, les procaryotes étant responsables de tous les autres processus chimiques tels la constitution de l'azote moléculaire de tous les organismes vivants.

Ces organismes en général asexués acquièrent leurs diversités par des processus de mutations extrêmement rapides. On peut s'attendre à ce qu'un gène partagé par toutes les bactéries acquiert 4 mutations simultanées toutes les 10 minutes. Plus de 90% des bactéries viendraient des sous-sols marins et terrestres participant à la transformation géochimique de la Terre.

En fait le monde vivant est séparé en virus et organismes cellulaires (eucaryotes et procaryotes).

Les virus actuels ont besoin d'infecter des cellules spécifiques pour prospérer.

Or le génome des virus est une mosaïque de génomes de virus antérieurs formés par recombinaison ce qui complique la reconstitution phylogénétique.

Les organismes cellulaires ont tous les caractéristiques semblables: génomes sous forme ADN-ARN, ADN (enzyme synthétisant un nouvel ADN à partir d'un brin d'ADN matrice), machinerie de transcription (synthèse d'un ARN messager à partir d'une matrice d'ADN) et de traduction (synthèse des protéines à partir du message de l'ARN), systèmes énergétiques. Toutes ces caractéristiques n'ont pu apparaître simultanément chez le premier organisme vivant.

Lors de la phase prébiotique ont dû être mis en place les mécanismes de réplication des acides nucléiques et du code génétique permettant le passage de l'acide nucléique aux protéines.

Or des virus non adaptés aux températures élevées (avec une tête et une queue pour le déplacement) semblent plus anciens dans la généalogie que les virus à tige raide et filamenteuse pouvant résister à de hautes températures.

En outre, on observe des similarités entre les ARN polymérases des mitochondries qui sont d'origine bactérienne et les ARN polymérases produits par des virus consommateur de bactéries. Il semble probable que l'organisme cellulaire ait acquis une ARN polymérase d'origine virale; les virus auraient été une étape nécessaire et antérieures à l'épanouissement des organismes cellulaires.

Mais ce champ de recherche virale en est à son début du fait de la diversité virale étonnamment plus grande que la diversité cellulaire.

Tableau des caractéristiques

Type	Origine	Milieu de vie	Caractéristiques	Impact
Virus	organique potentiel de vivant	thermophile (chaud+80) et mesophile (20 à 80)	Dépend eucaryotes pour expression et prolifération	
Organismes cellulaires: procaryotes (bactéries)	archeobactéries	thermophile	généralement asexués	responsable des processus chimiques
Organismes cellulaires: procaryotes (archeobactéries)	eucaryotes	thermophile et psychrophile (froid -5 à 20)	asexués	responsable des processus chimiques
Organismes	symbiose de	médium	généralement	responsable de

cellulaires: eucaryotes	bactéries (corps de Golgi et pour les plantes seulement de chloroplaste ), de virus (mitochondries) et de procaryotes à noyau d'ADN	sexués	la photosynthèse et des processus biologiques
-------------------------	---	--------	---

### Filiations



## 2.4 Evolution du message génétique ↑

La duplication des 2 rubans entrecroisés d'ADN engendre des erreurs de copie. Celui-ci remarquablement constant est de 1 par milliard de paires, c'est-à-dire 10 erreurs à chaque duplication de cellules humaines. Cette précision est due à des mécanismes autoreparateurs qui repère et rectifient les erreurs de copie.

Une conséquence des erreurs est que le ruban d'ADN s'allonge continûment ( et relativement linéairement à raison d'un facteur 10 à 20 par milliards d'années.

Des parties des plus en plus longues du message sont donc incohérentes et inutilisés (les introns).

Ces mutations sont en général sans impact mais peuvent révéler une caractéristique utile pour la survie et la reproduction de l'individu.

La comparaison de séquences d'ADN permet de reconstituer les arbres phylogénétiques en déterminant le taux d'écart entre les organismes pris deux à deux.

Ainsi du ribosome utilise par l'ADN pour constituer des protéines au moyen d'acides amines.

La recopie de la séquence codante de l'ADN dans un ARN messager qui sort du noyau et rencontre les ribosomes. Celui-ci, formé d'ARN et de protéines, glisse le long de l'ARN messager et le recopie à l'aide d'ARN de transfert. Ceux ci sont des bouts d'ARN qui porte à une extrémité 3 bases non appariées et de l'autre cote un acide amine. Si les 3 bases qui se collent à l'ARN messager s'apparient aux 3 bases sur l'ARN de transfert, l'acide amine associé s'ajoutent à la chaîne formant la protéine. Des ARN de transfert vont suivre en se succédant le chemin de l'ARN messager jusqu'à l'achèvement de la protéine.

L'arbre qui en résulte est potentiellement constitué de 2 millions de branches et indique sans ambiguïté que une ramification et donc un nombre de branches qui se réduit en remontant la complexité.

Cette ramification situe donc sa source dans une origine commune, même si le type d'organisme n'a pu être clairement identifié.

Un système vivant est une structure dissipatrice ouverte sur l'extérieur qui augmente son organisation interne en rejetant vers l'extérieur des molécules d'organisation moindre.

La croissance vers des organisations de plus en plus complexes est liée à des phénomènes non linéaires qui apparaissent lors des rétroactions (autocatalyses, inhibitions, activations).

En outre les organismes vivants se sont constitués progressivement.

Ainsi on évoque les hypercycles constitués d'une association de rétroactions chimiques qui agissent l'une sur l'autre. Si l'une des réactions est moins adaptée, elle tend à faire disparaître l'hypercycle, sinon elle le renforce.

Il y a donc conjuguaison mutuel d'effet. Il s'agit d'un mécanisme darwinien de sélection au niveau chimique.

## 2.5 Les voies de recherche ↑

Depuis les premières expériences en 1953 de Stanley Miller produisant la moitié des acides amines nécessaire à la vie dans une atmosphère réductrice, les progrès expérimentaux sont faibles. La prolifération de molécules semblables dans la soupe produite semble en effet bloquer le développement de substances plus évoluées.

En outre, les géophysiciens penchent plutôt pour une atmosphère oxydante à base de gaz carbonique et non pas de méthane. Certains ont vu dans l'espace, les germes de la vie. Si la production de nombreux acides aminés dans les nuages moléculaires semblent indiquer la prolifération des ingrédients nécessaire à la vie, le support de son développement n'est toujours pas connu.

Certains ont imaginé les comètes, pour d'autres les sources thermales profondes. Dans les deux cas, il

semble peu probable que la vie se soit développée dans des conditions si extrêmes, bien qu'un scénario crédible repose sur l'assimilation de carbone du gaz carbonique par réactions avec l'hydrogène sulfureux par une molécule " primordiale " à la surface de pyrites d'origine volcanique. Mais la température de 300C du fluide semblent compromettre le développement d'une chimie prebiotique.

Une voie intéressante semblent de toute façon être l'utilisation de certains minéraux comme matrice. Les cristaux d'argile ont été considérés comme de bons candidats par Desmond Bernal dès les années 50.

L'argile dont les cristaux peuvent croître est aussi un bon candidat, la matière organique constituée en brin d'acides nucléique gagnant finalement son autonomie par rapport à sa matrice.

Ces brins auraient constitués des " ARN " primitifs, simplifiés. L'ARN est capable de synthèse chimique et les voies de recherche se tourne vers la sélection d'ARN in vitro , afin de sélectionner des formes qui auraient pu exister dans le passé.

L'étude des cellules actuelles et leur mode de fonctionnement apparemment inutilement complexe pourraient également être la trace des chemins de traverses qu'a emprunte la vie. En quelque sorte, des résidus fossiles.

Reste l'intérêt des recherches de la chimie prebiotique sur Mars, Titan ou Europe qui peut guider fortement les axes d'études en évolution prebiotique...

## 2.6 L'épopée de la vie ↑

Pendant plus de 2 milliards d'années, la Terre ne connaîtra que les bactéries.

Il y a 3,4 milliards d'années (voire 3,8 milliards), des organismes monocellulaires sont apparues qui telle la bactérie de l'acide lactique fermentait des molécules organiques fournis par les météorites ou les comètes.

Puis vinrent les algues bleues monocellulaires qui, par l'intermédiaire de la photosynthèse, extrayèrent le carbone du gaz carbonique et en rejetèrent l'oxygène. La teneur en oxygène de l'atmosphère atteignit 1 %.

3 groupes se forment les urcaryotes (notre lignée) , les bactéries (qui gouvernent notamment une grande part des processus géochimique de la planète) et les archeobactéries qui ne résistent pas à l'oxygène et sont aujourd'hui réfugiés dans des niches (les sources sulfureuses pour les thermoacidophiles , les tubes digestifs ou les marais pour les methanogenes qui utilisaient l'hydrogène aujourd'hui disparu de l'atmosphère).

Grâce à l'augmentation de la teneur en oxygène et à la formation consécutive de la couche d'ozone protectrice des ultraviolets , les bactéries ne restent plus confiner en eau profonde.

La sexualité, croisement de patrimoine différencié pour multiplier les expériences apparut voici 1 milliard d'années.

## 2.7 L'explosion du Cambrien ↑

Voici 600 millions d'années les océans virent l'explosion de formes de vies multicellulaires très diversifiées dont une infime fraction survécue. Les continents demeuraient totalement stériles.

Voici 350 millions d'années les premières plantes apparurent, ainsi que les insectes qui colonisèrent les continents.

L'apparition des plantes à fleurs et les phénomènes de symbioses avec les insectes étendit rapidement la couverture végétale. L'organisation des insectes devint encore plus efficace dans une dernière période avec l'apparition des insectes sociaux, il y a un peu plus de 100 millions d'années.

Les plantes en consommant le CO2 ont fait diminuer très fortement l'effet de serre, en augmentant parallèlement l'oxygène jusqu'à sa teneur actuelle. La diminution de CO2 a réduit la masse végétale.

Mais l'oxygène demeuraient un poison.

Une nouvelle branche est donc apparue peu après les insectes pour profiter cette ressource inexploitée en

le respirant: nous -mêmes, les animaux.

Tout d'abord vinrent les amphibiens, stade intermédiaire entre les animaux terrestres et aquatiques., puis rapidement des animaux purement terrestres reptiles puis mammifères. Les premiers de cet ordre animal apparurent voici 250 millions d'années.

La réaction fortement exothermique basée sur la respiration de l'oxygène permirent aux animaux un déplacement continu sur la Terre pour profiter de la couverture végétale, un déplacement également vélocité ce qui permit d'intégrer les insectes dans la nourriture ainsi que les animaux dans la poursuite du combat aquatique.

## 2.8 Le choix ↑

Les plantes détournent 25% du CO<sub>2</sub> à leur propre usage depuis 350 millions d'années. Lorsqu'elles meurent une partie du carbone produit de la décomposition de la matière organique s'oxyde et retourne au CO<sub>2</sub>. L'autre partie passe dans le sol.

Les hydrocarbures sont le résultat de cet enfouissement du carbone dans le sol, essentiellement par les plantes luxuriantes du Carbonifère.

Aujourd'hui l'Homme expulse les hydrocarbures dans l'atmosphère ainsi que des composants soufrés.

Ces deux éléments tendent à augmenter rapidement l'effet de serre.

Des produits dérivés tels les fluorocarbures ont également un effet destructeur sur la couche d'ozone.

Le taux de gaz carbonique a ainsi augmenté de 25% depuis le début du siècle.

Du fait de l'importance de l'océan et des dizaines de facteurs entrant en jeu, il est difficile d'estimer l'évolution de la température. Seule une variation d'un degré a jusqu'alors été constatée.

Mais la poursuite de ce mouvement peut conduire à deux situations.

Si la rétroaction naturelle permet la limitation de l'effet de serre et, malgré la diversité des rejets notamment soufrés, la température resterait dans la gamme déjà atteinte avant le Carbonifère (élévation de 10 à 15 degrés)

Si la rétroaction ne compense pas l'effet de serre une rétroaction positive peut apparaître et la divergence engendrée peut à terme provoquer une augmentation incontrôlable de la température et la disparition des océans.

Ce qui est essentiel est que les modèles ne permettent pas en l'état de conclure formellement sur l'impossibilité de cette divergence thermique.

Résumons l'histoire terrestre

-4,55 milliards d'années Formation de la Terre

-4,45 début du bombardement terrestre par astéroïdes et comètes. Formation de la Lune par collision de la Terre avec une miniplanète.

-4,3 fin du bombardement météoritique intensif

-4 apparition de socle continentaux par accumulation des carbonates

-3,8 apparition de la vie à partir des acides aminés du coeur des chondrites carbonées (météorites)

-3,6 fin du bombardement cométaire intensif

-2,7 apparition des premières algues bleues et des eucaryotes

-2 profusion des algues bleues (montée de l'oxygène atmosphérique à 1%)

-1 apparition de la sexualité

-0,6 apparition des formes multicellulaire

-0,4 apparition des premières plantes terrestres

-0,3 condensation du gaz carbonique par les plantes (l'oxygène monte à 21% et le gaz carbonique disparaît)

-0,2 apparition des grands ordres animaliers: reptiles , mammifères et oiseaux

-0,1 stabilisation des insectes sociaux

-0,04 apparition des primates

Que fera l'Homme ?

[Sommaire](#)

