

Aux origines de la vie : hypothèses et probabilités (2^{ème} partie)

Philippe Mikaeloff

Comprendre l'origine de la vie sur terre est un objectif que l'on ne pourra peut-être jamais atteindre. Depuis une cinquantaine d'années la connaissance des mécanismes intimes de la vie a fait un bond prodigieux.

Même si la définition de la vie est sujette à caution parce que les frontières entre l'inerte et le vivant ne sont pas tranchées, toute vie sur terre repose sur l'unité cellulaire, cellules toutes pourvues des mêmes mécanismes énergétiques, des mêmes voies métaboliques, de la même commande génétique.

Les complexités du métabolisme cellulaire, de la commande génétique dépendent d'un langage biochimique complexe : Elles nous font entrevoir toute la difficulté qu'il y aura de remonter au tout début de la vie.

Il n'est pas possible que la vie soit née déjà avec une telle complexité. Mais comment savoir pourquoi elle est apparue, par quel mécanisme, car toutes les traces de vie primitive remontant à plus de 3,5 milliards d'années ont disparu.

Depuis quelques années les laboratoires par manipulation génétique ont réussi des synthèses virales ou bactériennes étonnantes. D'autres chercheurs essaient de construire une cellule entièrement artificielle : Malgré leurs prouesses pour l'instant nous sommes encore incapables de recréer la vie au laboratoire. Si on y parvenait un jour ce serait un choc immense pour l'humanité. Cette cellule synthétique serait d'ailleurs une copie des êtres vivants actuels. De toute façon cette création artificielle ne nous apprendrait probablement pas grand-chose sur l'origine de la vie

C'est pourquoi mon exposé sur ce sujet comportera peu de certitudes, mais beaucoup d'hypothèses et de probabilités. Nous allons remonter progressivement aux origines de la vie à l'appui de toute une série d'arguments scientifiques et expérimentaux.

D'abord la recherche des plus anciens vestiges de la vie :

Une façon d'aborder le mystère de la vie a été de chercher des traces fossiles : Les repérer n'est pas facile car seule une infime proportion de cette période ancienne de plus de 3 milliards d'années s'est fossilisée.

Les plus anciennes roches sédimentaires contenant du carbone d'origine biologique ont été découvertes dans les années 1990 sur les sites d'Akilia et d'Isua au sud-ouest du Groenland dans des roches métamorphiques anciennes datées de 3 milliards 800 millions d'années.

En effet le carbone organique piégé dans les sédiments est identifiable par le rapport de deux isotopes stables du carbone, C_{12} et C_{13} parce que les organismes vivants métabolisent plus d'atomes de C_{12} .

Donc la vie serait apparue environ 800 millions d'années après la formation de la terre dont l'âge est lui-même déterminé par les rapports isotopiques des minerais de plomb (4,5 milliards d'années). Mais ces travaux ont été récemment contestés à la suite d'analyses d'échantillons par spectroscopie Raman.

Les plus anciens vestiges fossiles de vie identifiables au microscope sont datés de 3,5 milliards d'années : Ils ont été découverts en Afrique du sud et en Australie. On appelle ces reliques de vie sous-marine des stromatolithes, qu'on a pu dater. Ce sont des formations étranges, coniques ressemblant à des champignons géants posés sur les plages ou des fonds marins sableux, qui existent encore. Au microscope elles révèlent des filaments attribués à des bactéries filamenteuses séparées par des particules calcaires. Ces bactéries vivaient près de sources hydrothermales sulfureuses et n'avaient pas besoin de lumière, car elles se sont formées par chimiosynthèse.

En fait on s'est rendu compte qu'il y a déjà 3,5 milliards d'années existait une diversité biologique.

Dans notre quête sur l'origine de la vie il nous faut aller à la recherche de la cellule ancestrale primitive commune : Conséquence de l'évolution Tous les êtres vivants se forment à partir d'une cellule unique qui lui vient du ou de ses parents. En remontant dans le temps on peut affirmer que tous les êtres vivants dérivent d'un ancêtre commun appelé cellule ancestrale.

Jusque dans les années 1970 on estimait qu'il y avait 2 types de cellules vivantes : Les plus anciennes qui ne possédaient pas de noyau surnommées par le microbiologiste Suisse en 1930 Edouard Chatton des procaryotes et des cellules évoluées munies d'un noyau, surnommées des eucaryotes. Les procaryotes sont à l'origine des innombrables bactéries. Les eucaryotes sont les constituants de tous les êtres vivants pluricellulaires.

On sait qu'il a fallu plus d'un milliard d'années d'évolution à partir des procaryotes pour que les cellules eucaryotes apparaissent.

Dans les années 1970 la biologiste Américaine Lynn Margulis a pratiquement prouvé que les cellules eucaryotes qui étaient anaérobies à l'origine ont acquis les mitochondries et les chloroplastes par endosymbiose d'un procaryote, donc par phagocytose d'une bactérie aérobie. Les mitochondries sont de petits organites responsables de la respiration cellulaire. Elles transfèrent les électrons par une succession de réactions d'oxydoréductions pour aboutir à la formation de l'ATP, source d'énergie universelle de toutes les cellules, électrons finalement captés par l'oxygène. Dans les années 1980 la preuve de l'origine bactérienne des mitochondries est venue de l'étude de leur ARN ribosomal.

Autre grande découverte, en 1977 le biologiste Américain Carl Woese démontre qu'il faut ajouter une 3^{ème} lignée de cellules qu'il appelle archéobactéries. Pour déterminer les relations de parenté entre les différents organismes du monde vivant il étudie une molécule universelle présente chez tous les êtres vivants, appelé ARN ribosomique 16S, un ARN des ribosomes, où s'élaborent les protéines. Il a comparé les différentes molécules de cet ARN véritable empreinte génétique : 2 organismes sont d'autant plus proches que les molécules de cet ARN se ressemblent. Cet ARN long de plus de 3000 nucléotides a évolué suffisamment lentement pour avoir gardé la trace d'évènements anciens. En étudiant des bactéries anaérobies productrices de méthane, Carl Woese eut la surprise de constater que leur empreinte génétique était éloignée des bactéries classiques, alors qu'il s'agissait pourtant de procaryotes. C'est ainsi qu'il démontra l'existence de 3 grandes lignées du monde vivant : Les bactéries qui sont des procaryotes, les eucaryotes et les archéobactéries, qui diffèrent donc par leurs ribosomes.

On a ainsi pu construire l'arbre universel de la vie : La longueur des branches séparant 2 organismes est d'autant plus petite que les séquences de leur ARN 16S se ressemblent. Le style de vie des archéobactéries rappelle les conditions qui auraient pu exister sur la terre il y a 3 milliards d'années avec une atmosphère sans oxygène, d'origine volcanique. En les appelant archéobactéries Carl Woese a pensé qu'il s'agissait probablement de cellules vivantes parmi les plus anciennes. En effet on a découvert toute une série d'archéobactéries qui vivent dans des conditions extrêmes, encore appelées extremophiles, qu'on n'aurait pas imaginées il y a 30 ans : On peut citer les halophiles vivant dans des conditions d'hyper salinité qu'on trouve dans la Mer Morte. Parmi les acidophiles, *ferroplasma acidophilum* a été découvert en Russie en 2007 dans un réacteur alimenté par de la pyrite. Cette bactérie survit dans l'acide sulfurique et tire son énergie du sulfure de fer : Elle oxyde le fer de la pyrite et l'incorpore dans ses protéines. On a retrouvé ce microorganisme dans des zones volcaniques. On peut donc imaginer qu'il est apparu dans les conditions extrêmes qui existaient sur terre à l'origine de la vie et qu'il n'a pas évolué depuis. D'autres extrémophiles résistent aux hautes pressions, à de fortes doses de radioactivité, comme la bactérie *deinococcus radiodurans* capable de se reconstituer après une irradiation qui fragmente son ADN en plus de 150 fragments. Enfin il existe des archéobactéries qui vivent à des températures élevées, par exemple dans les sources chaudes du parc de Yellowstone et qui supportent entre 90° et 113° Celsius.

Les chercheurs se sont demandés comment ces bactéries hyperthermophiles pouvaient survivre à de telles températures car l'une des conséquences devrait être la dénaturation des protéines. Or ces bactéries sont encore capables de se diviser à des températures proches du point d'ébullition. C'est ce que l'on

constate au niveau des sources hydrothermales profondes découvertes en 1977, surnommées les fumeurs noirs, d'origine volcanique, par exemple dans les îles Eoliennes. Ces hyperthermophiles tirent leur énergie de l'hydrogène présent dans les vapeurs volcaniques.

Les chercheurs sont parvenus à expliquer leur mécanisme d'adaptation à ces hautes températures : L'étude de leurs protéines par diffraction aux rayons X a montré que ces molécules sont stabilisées par un plus grand nombre de liaisons électrostatiques. Leur ADN résiste à de hautes températures car la double hélice s'est enroulée sur elle-même. Au début des années 1980 l'Américain Martin Gellert a découvert qu'une enzyme la reverse gyrase était capable d'utiliser l'énergie de l'ATP pour forcer la double hélice d'ADN à cet enroulement et ainsi contrecarrer l'effet de la température.

Dans les années 1990 l'hypothèse que les premières cellules sont apparues à haute température au fond des océans a séduit beaucoup de chercheurs.

Or un certain nombre d'arguments sont venus récemment contredire cette hypothèse séduisante : Le biologiste Français Patrick Forterre a démontré que l'ancêtre commun des bactéries et des archéobactéries ne possédaient pas cette enzyme, la reverse gyrase, autrement dit ils ne pouvaient pas être hyperthermophiles. Ne possédant pas la reverse gyrase il est pratiquement sûr que le dernier ancêtre commun aux 3 lignées de l'arbre vivant n'était pas hyperthermophile. Ce dernier a dû se développer à une température plus clémente.

Nous arrivons donc à cette cellule ancestrale commune dont dérivent tous les êtres vivants que les anglo-saxons ont surnommé LUCA (Last Universal Common Ancestor). Aujourd'hui on peut établir son portrait robot : Cet ancêtre commun était une cellule procaryote anaérobie qui métabolisait le soufre en milieu acide. Elle contenait des chaînes de transport d'électrons et utilisait l'ATP. Il s'agissait plutôt d'une communauté de cellules, dotées de gènes courts qu'elles échangeaient entre elles.

Actuellement plus de 700 génomes complets ont été séquencés : La comparaison des génomes de bactéries, d'archéobactéries et d'eucaryotes a permis d'isoler 80 gènes universels certainement déjà présents dans la cellule ancestrale.

Parmi ces gènes universels la présence de gènes codant pour des protéines prouve que cet ancêtre était une cellule dotée de ribosomes puisqu'elle fabriquait des protéines.

Des recherches en génie génétique ont par ailleurs montré que le nombre de gènes minimum compatible avec la vie est d'environ 250.

Le monde à ARN : Pendant longtemps on a pensé que la cellule ancestrale possédait déjà un génome à ADN comme toutes les cellules vivantes actuelles. On sait que la réplication de l'ADN implique 3 catégories d'enzymes : une

hélicase, une primase et des ADN polymérase. Or ces 3 enzymes qui sont des protéines ne sont pas présentes dans la liste des protéines universelles.

C'est pourquoi il a été proposé par 2 chercheurs Russes Arcady Mushegian et Eugène Koonin que cette cellule ancestrale possédait encore un génome à ARN.

C'est ultérieurement qu'elle se serait dotée d'un génome à ADN. Le passage du génome ARN à un génome ADN fut relativement simple : A l'aide de 2 modifications chimiques de l'ARN, le remplacement d'une base azotée l'Uracile par la Thymine et une réduction du sucre de l'ARN le ribose en désoxyribose qui donne une plus grande stabilité. L'ADN est donc un ARN modifié.

Certains proposent que cette transformation a été accomplie par des virus : l'ADN aurait été inventé par des virus et ensuite transféré aux cellules primitives.

L'ADN apporte plusieurs avantages par rapport à l'ARN : Il a une plus grande stabilité chimique. Il permet de construire de plus grands génomes qui peuvent porter plus d'informations génétiques. En revanche l'ADN a perdu les capacités enzymatiques de l'ARN.

Il y a de nombreux arguments qui font que l'ARN a précédé l'ADN, notamment le fait que la réplication de l'ADN nécessite toujours une petite amorce d'ARN.

On a mis en doute que l'ARN ait précédé les protéines dans les cellules primitives jusqu'en 1981 lorsque le chimiste Américain Thomas Cech, prix Nobel de chimie découvre que les ARN ribosomiaux ont des propriétés catalytiques. La découverte de propriétés enzymatiques de l'ARN fut importante et prouve que l'ARN a précédé la synthèse des protéines.

A ce stade les gènes étaient longs seulement de 50 à 100 nucléotides. L'évolution s'est faite vers des gènes de plus en plus longs, des protéines plus complexes.

La cellule ancestrale commune aux 3 lignées était déjà le résultat d'une longue histoire évolutive, cellule beaucoup trop complexe pour qu'on puisse l'assimiler à l'origine de la vie.

Remonter aux origines de la vie soulève d'immenses difficultés : Depuis Aristote, la théorie prédominante sur cette origine qui s'est imposée comme un dogme pendant 2 millénaires fut celle de la génération spontanée. Il faudra attendre 1862 pour que la vive controverse qui opposa Pasteur à Félix Pouchet se termine. Au XIX^e siècle beaucoup dont Pasteur furent des adeptes du vitalisme : Dans l'ignorance des mécanismes intimes de la vie, cette théorie considérait la vie comme de la matière animée d'un principe vital. Donc la vie ne devait pas être réductible aux lois physico-chimiques.

A la fin du XIX^e siècle apparaît la théorie de la panspermie soutenue par le physicien lord Kelvin, par Von Helmholtz et Arrhenius. Aujourd'hui elle a encore ses défenseurs. Pourtant on peut la considérer avec scepticisme en raison de l'action des rayons cosmiques sur les cellules ou les spores. De toute façon si

jamais elle était valide cela ne ferait que reporter ailleurs le problème de l'origine de la vie.

En 1953 la démonstration expérimentale du chimiste Américain Stanley Miller qu'un mélange gazeux réducteur simple simulant l'atmosphère terrestre primitive exposé à des décharges électriques pendant une semaine puisse produire plusieurs acides aminés et d'autres composés organiques suscita un grand enthousiasme. Dès lors de nombreux laboratoires vont s'intéresser à l'origine de la vie.

A la lumière de ces recherches peut-on aujourd'hui entrevoir ce qui s'est passé à l'origine, donc dans la période prébiotique ? De même que l'origine de notre univers a toutes les raisons de s'expliquer par des processus physiques, la plupart des biologistes défendent l'idée que la vie est née sur terre par suite de phénomènes physico-chimiques, dans lesquels le hasard fut omniprésent.

Première question, la vie serait-elle née par hasard ? Si la vie est née par une pure combinaison de phénomènes aléatoires comme le pensait le biologiste et Prix Nobel Jacques Monod pour qui « L'univers n'était pas gros de la vie », alors les probabilités de son apparition sont si infimes qu'on ne peut y voir qu'un événement unique dans l'histoire du cosmos.

Mais aujourd'hui la majorité des biologistes, des biochimistes tel l'Américain Stuart Kauffman sont persuadés du contraire : A partir de simulations informatiques il a élaboré une série de réseaux autocatalytiques, donc généré des molécules de plus en plus complexes capables d'auto organisation. L'émergence de la vie a du commencer par l'élaboration de ces automates chimiques.

Pour le biologiste Belge Christian de Duve, Prix Nobel de Médecine en 1974, « La vie est une nécessité cosmique » : En effet les processus prébiotiques par leur nature chimique ont du suivre une voie déterministe et probablement reproductible ailleurs dans l'univers.

Avant de remonter le temps des événements prébiotiques il est fondamental de rappeler en quoi consistent les capacités auto organisatrices des molécules pour mieux appréhender ce qui a pu se passer à l'origine de la vie.

L'organisation supra moléculaire joue un rôle fondamental en biologie : Il en a été ainsi à l'origine de la vie. La matière s'est auto organisée sous l'action des forces de gravitation dès l'origine de l'univers. Ensuite sur terre s'est produite une auto organisation de la matière sous l'influence des forces électromagnétiques. Toute association spécifique entre 2 molécules fait intervenir de l'information : Les molécules sont capables d'auto organisation. La chimie supramoléculaire ainsi dénommée en 1978 a valu au Français Jean-Marie Lehn le prix Nobel de Chimie en 1989.

Il a mis en évidence les phénomènes de reconnaissance entre molécules : Ainsi des virus comme les virus de la mosaïque du tabac par l'intermédiaire de protéines spécifiques situés sur leur membrane reconnaissent les cellules qu'ils vont infecter parce qu'elles sont elles-mêmes porteuses sur leur membrane de protéines complémentaires. Cette reconnaissance moléculaire avait été pressentie en 1894 par le chimiste Allemand Emil Fischer qui inventa l'image de la clé et de la serrure entre 2 molécules.

Les structures supramoléculaires ont été étudiées à l'aide de puissantes techniques d'analyse : La diffraction des rayons X, la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire.

On a pu mettre en évidence l'auto assemblage spontané de double hélice inorganique ou hélicate, par exemple le groupement 2-bipyridine en présence d'ions Cuivre. Il y a donc une grande analogie avec la structure en double hélice de l'ADN.

Les assemblages supra moléculaires peuvent aboutir à la formation de films ou de vésicules tels qu'on a du les voir à l'ère prébiotique.

Il y a donc une progression des structures supramoléculaires vers la complexité : L'assemblage supramoléculaire conduit à des systèmes capables de copie, de réplication. On a pu observer au laboratoire l'autoréplication d'oligonucléotides par autocatalyse.

Dans des systèmes chimiques auto répliquants utilisant 3 constituants de départ, il peut même se produire une compétition entre les constituants moléculaires et donc un processus de sélection. Tout le problème est effectivement de savoir si la sélection Darwinienne s'applique déjà à l'organisation moléculaire.

Les phénomènes de reconnaissance moléculaire, leur auto assemblage permettent de mieux appréhender les mécanismes chimiques à l'origine de la vie.

Le monde des protocellules à ARN était encore trop complexe pour avoir été à l'origine de la vie : Reconstituer le mécanisme de la vie prébiotique dont nous ne gardons aucune trace est une tâche ardue. Nous n'avons aucune certitude sur l'origine et le déroulement des premiers instants de la vie qui nous restera peut-être inaccessible.

Première difficulté on ne sait pas aujourd'hui comment s'est constitué l'ARN doué de réplication. Jusqu'à présent personne n'a réussi à synthétiser de l'ARN dans les conditions prébiotiques. Plusieurs systèmes précurseurs de l'ARN ont été recherchés au laboratoire par la biochimiste Française Marie-Christine Maurel : A l'époque prébiotique des composés plus simples que l'ARN comme le NTP ou desoxynucléoside Triphosphate ainsi que le N6-ribosyladenine ont pu être produit.

Le biochimiste Allemand Manfred Eigen, prix Nobel a expérimenté au laboratoire plusieurs mélanges de nucléotides avec une enzyme de réplication de

l'ADN : Après un temps d'observation variable plusieurs ARN de longueur différente sont apparus. Il s'en est suivi un processus de sélection moléculaire avec allongement des ARN à 150 nucléotides capables de s'autorépliquer.

La sélection Darwinienne s'applique donc à l'échelle supramoléculaire. Se peut-il que dans un milieu riche en composés organiques soit apparue une telle molécule d'ARN, que l'on peut appeler un gène nu ?

Deux chimistes Danois Michael Ehgolm et Peter Nielsen ont décrit une nouvelle molécule alternative possible aux acides nucléiques l'APN ou Acide Peptique Nucléique, construit sur un squelette peptidique plus simple que l'ARN.

Le chimiste Ecossais Graham Cairn-Smith lui a testé l'hypothèse que des cristaux d'argile aient pu servir de matrice. Selon lui le précurseur génétique de nos acides nucléiques pouvait être de nature minérale.

Aujourd'hui 2 grandes hypothèses sont avancées pour reconstituer les origines de la vie : La première est celle de la soupe prébiotique : On doit cette idée au Britannique John Haldane. Toute une variété de molécules organiques auraient été produites par des processus chimiques aléatoires dans les océans.

La composition de l'atmosphère primitive de la terre reste débattue : On sait qu'il n'y avait pas d'oxygène. Un des arguments importants pour l'absence d'oxygène est le fait que de grandes quantités de fer ferreux se soient déposées au Précambrien sous forme de fer rubané. On sait que le fer ferreux ne se forme qu'en l'absence d'oxygène. Plus tard l'oxygène atmosphérique sera produit par la photosynthèse des cyanobactéries. L'atmosphère terrestre primitive était certainement riche en gaz carbonique libéré par l'activité volcanique, ainsi qu'en sulfure d'hydrogène. Elle était également composée de monoxyde de carbone, d'azote moléculaire probablement d'hydrogène et de méthane dont l'importance est contestée. Était-elle réductrice ou neutre ?

Une importante réaction prébiotique fut la formation de l'acide cyanhydrique (HCN) à partir de molécules de méthane et d'atomes d'azote sous l'action des rayons ultraviolets. Une autre synthèse prébiotique fut le formaldéhyde (HCHO) par réaction entre le méthane et la vapeur d'eau. Acide cyanhydrique et formaldéhyde furent à l'origine de bases azotées comme l'adénine et des premiers sucres.

L'énergie nécessaire à la vie primitive a pu venir de réactions d'oxydoréduction impliquant des composés inorganiques comme le sulfure d'hydrogène (H₂S) d'origine volcanique.

Le biochimiste Christian de Duve est persuadé que des thioesters formés à partir de groupements thiols et d'acide carboxylique dans un environnement volcanique riche en soufre ont été des sources d'énergie du protométabolisme, précurseurs de l'ATP.

Mais le milieu prébiotique soulève une critique : Pour se développer il aurait fallu des concentrations importantes de substances organiques. Or elles étaient probablement trop diluées dans l'océan primitif.

Pour l'Américain Carl Woese et l'Allemand Gunter Wachtshauer la conception d'une vie naissant dans une soupe prébiotique est invraisemblable. L'américain Robert Shapiro l'a même surnommé « Le mythe de la soupe prébiotique ».

C'est pourquoi une deuxième hypothèse fut proposée, celle d'un métabolisme primitif sur des surfaces minérales ; L'anglais John Desmond Bernal a proposé une solution alternative à la soupe prébiotique : Des associations moléculaires ont pu être catalysées par adsorption sur des feuillets d'argile très répandus sur la terre primitive. Les argiles composées de roches sédimentaires sont capables de retenir des substances par des liaisons électrostatiques.

Dans les années 1970 on a montré expérimentalement qu'une argile particulière la montmorillonite est capable de concentrer des aminoacides entre ses feuillets, de favoriser leur polymérisation en agissant comme des enzymes primitives.

Le rôle prébiotique de ce type d'argile a été confirmé au laboratoire par l'Américain Leslie Orgel : Il a réalisé la synthèse d'oligonucléotides d'une longueur supérieure à 50 monomères. Or la plupart des biologistes admettent que cette longueur permet à un système génétique primitif de s'auto répliquer.

L'Allemand Gunter Wachtshauer a proposé que le premier organisme biochimique était fait de molécules organiques chargées négativement, se développant sur une surface minérale positivement chargée constituée de pyrite. La pyrite tapisse les parois des cônes volcaniques, source d'électrons et d'énergie elle se forme par réaction du sulfure de fer avec l'hydrogène sulfureux et se trouve en abondance au voisinage des sources chaudes sous-marines.

Le chimiste Britannique Graham Cairn-Smith a même proposé que la vie soit née directement au sein du monde minéral. Des gènes minéraux peut-être argileux auraient eu la propriété de former des structures répliquatives susceptibles d'évoluer.

Ces organismes primitifs constitués de molécules organiques autocatalytiques se développant sur des surfaces minérales constituent aujourd'hui une voie de recherche intéressante de la chimie prébiotique.

Mais alors comment savoir à partir de quand les processus métaboliques prébiotiques ont été enfermés par une membrane dans une protocellule ?

Pour Christian de Duvé il est probable qu'une sorte de protocytole siège d'un métabolisme ayant atteint le stade de la synthèse protéique ait précédé la compartimentalisation. Au contraire plusieurs chercheurs dont Carl Woese pensent qu'il y a eu des protocellules dès l'origine pour des raisons énergétiques. Or la formation de membranes imperméables aux grosses molécules laissant passer des nutriments et des déchets est d'une grande

complexité. Au laboratoire on sait fabriquer par émulsion d'acide gras dans l'eau de petites vésicules ou liposomes. On sait les faire croître.

Deux solutions originales ont été imaginées à l'origine des membranes cellulaires : Le biophysicien Français André Brack a proposé l'apparition d'automates chimiques protégés par des semi membranes de phospholipides posées sur des surfaces minérales. Ces structures en grossissant font des boursouflures et finissent par se détacher en protocellules autonomes. L'Allemand Gunter Blobel, prix Nobel de médecine a récemment proposé une solution ingénieuse au problème de l'imperméabilité des premières membranes cellulaires : Il suppose que les premières vésicules étaient vides. Sur leur paroi se seraient fixés des organites comme les ribosomes et le matériel génétique primitif. Ces vésicules auraient fini par se replier autour de ces organites qui leur étaient attachés pour se refermer formant ainsi une membrane faite d'une bi couche de lipides.

On connaît l'existence de bactéries surnommées bactéries L qui n'ont pratiquement pas de paroi cellulaire et prennent donc une forme sphérique. Elles sont très vulnérables aux variations du milieu extérieur. Ce sont probablement des vestiges des premiers temps de la vie

En conclusion, étudier l'origine de la vie comme celle de l'univers sont deux sujets qui continueront de fasciner les hommes. Malgré beaucoup d'incertitudes nous avons progressé en un demi-siècle sur le mécanisme de l'origine de la vie. Elle découle certainement de processus physicochimiques par étapes.

Si la terre s'est formée il y a 4,5 milliards d'années nous savons que la vie est apparue environ 800 millions d'années plus tard il y a plus de 3 milliards 500 millions d'années sous la forme de cellules procaryotes, au départ anaérobies : On s'est rendu compte récemment qu'il y a 3 milliards d'années ces procaryotes étaient déjà diversifiés. C'est alors que ce sont développées des cellules procaryotes dotées d'une activité photosynthétique les cyanobactéries qui ont progressivement enrichi l'atmosphère en oxygène.

Il a fallu plus d'un milliard d'années de sélection Darwinienne pour que les cellules procaryotes donnent naissance aux cellules eucaryotes : Les premiers eucaryotes fossilisés connus les grypanias datés de 2,2 milliards d'années sont de la famille des algues, d'abord uni et ensuite pluricellulaires.

L'évolution de la vie sur terre s'est donc faite sous forme unicellulaire pendant longtemps : Jusqu'à présent les premiers êtres pluricellulaire étaient datés de 600 millions d'années, donnée remise en cause par la découverte récente de fossiles Gabonais.

Aux origines de la vie : hypothèses et probabilités (2^{ème} partie)

Philippe Mikaeloff

Comprendre l'origine de la vie sur terre est un objectif que l'on ne pourra peut-être jamais atteindre. Depuis une cinquantaine d'années la connaissance des mécanismes intimes de la vie a fait un bond prodigieux.

Même si la définition de la vie est sujette à caution parce que les frontières entre l'inerte et le vivant ne sont pas tranchées, toute vie sur terre repose sur l'unité cellulaire, cellules toutes pourvues des mêmes mécanismes énergétiques, des mêmes voies métaboliques, de la même commande génétique.

Les complexités du métabolisme cellulaire, de la commande génétique dépendent d'un langage biochimique complexe : Elles nous font entrevoir toute la difficulté qu'il y aura de remonter au tout début de la vie.

Il n'est pas possible que la vie soit née déjà avec une telle complexité. Mais comment savoir pourquoi elle est apparue, par quel mécanisme, car toutes les traces de vie primitive remontant à plus de 3,5 milliards d'années ont disparu.

Depuis quelques années les laboratoires par manipulation génétique ont réussi des synthèses virales ou bactériennes étonnantes. D'autres chercheurs essaient de construire une cellule entièrement artificielle : Malgré leurs prouesses pour l'instant nous sommes encore incapables de recréer la vie au laboratoire. Si on y parvenait un jour ce serait un choc immense pour l'humanité. Cette cellule synthétique serait d'ailleurs une copie des êtres vivants actuels. De toute façon cette création artificielle ne nous apprendrait probablement pas grand-chose sur l'origine de la vie

C'est pourquoi mon exposé sur ce sujet comportera peu de certitudes, mais beaucoup d'hypothèses et de probabilités. Nous allons remonter progressivement aux origines de la vie à l'appui de toute une série d'arguments scientifiques et expérimentaux.

D'abord la recherche des plus anciens vestiges de la vie :

Une façon d'aborder le mystère de la vie a été de chercher des traces fossiles : Les repérer n'est pas facile car seule une infime proportion de cette période ancienne de plus de 3 milliards d'années s'est fossilisée.

Les plus anciennes roches sédimentaires contenant du carbone d'origine biologique ont été découvertes dans les années 1990 sur les sites d'Akilia et d'Isua au sud-ouest du Groenland dans des roches métamorphiques anciennes datées de 3 milliards 800 millions d'années.

2

En effet le carbone organique piégé dans les sédiments est identifiable par le rapport de deux isotopes stables du carbone, C_{12} et C_{13} parce que les organismes vivants métabolisent plus d'atomes de C_{12} .

Donc la vie serait apparue environ 800 millions d'années après la formation de la terre dont l'âge est lui-même déterminé par les rapports isotopiques des minerais de plomb (4,5 milliards d'années). Mais ces travaux ont été récemment contestés à la suite d'analyses d'échantillons par spectroscopie Raman.

Les plus anciens vestiges fossiles de vie identifiables au microscope sont datés de 3,5 milliards d'années : Ils ont été découverts en Afrique du sud et en Australie. On appelle ces reliques de vie sous-marine des stromatolithes, qu'on a pu dater. Ce sont des formations étranges, coniques ressemblant à des champignons géants posés sur les plages ou des fonds marins sableux, qui existent encore. Au microscope elles révèlent des filaments attribués à des bactéries filamenteuses séparées par des particules calcaires. Ces bactéries vivaient près de sources hydrothermales sulfureuses et n'avaient pas besoin de lumière, car elles se sont formées par chimiosynthèse.

En fait on s'est rendu compte qu'il y a déjà 3,5 milliards d'années existait une diversité biologique.

Dans notre quête sur l'origine de la vie il nous faut aller à la recherche de la cellule ancestrale primitive commune : Conséquence de l'évolution Tous les êtres vivants se forment à partir d'une cellule unique qui lui vient du ou de ses parents. En remontant dans le temps on peut affirmer que tous les êtres vivants dérivent d'un ancêtre commun appelé cellule ancestrale.

Jusque dans les années 1970 on estimait qu'il y avait 2 types de cellules vivantes : Les plus anciennes qui ne possédaient pas de noyau surnommées par le microbiologiste Suisse en 1930 Edouard Chatton des procaryotes et des cellules évoluées munies d'un noyau, surnommées des eucaryotes. Les procaryotes sont à l'origine des innombrables bactéries. Les eucaryotes sont les constituants de tous les êtres vivants pluricellulaires.

On sait qu'il a fallu plus d'un milliard d'années d'évolution à partir des procaryotes pour que les cellules eucaryotes apparaissent.

Dans les années 1970 la biologiste Américaine Lynn Margulis a pratiquement prouvé que les cellules eucaryotes qui étaient anaérobies à l'origine ont acquis les mitochondries et les chloroplastes par endosymbiose d'un procaryote, donc

par phagocytose d'une bactérie aérobie. Les mitochondries sont de petits organites responsables de la respiration cellulaire. Elles transfèrent les électrons par une succession de réactions d'oxydoréductions pour aboutir à la formation de l'ATP, source d'énergie universelle de toutes les cellules, électrons finalement captés par l'oxygène. Dans les années 1980 la preuve de l'origine bactérienne des mitochondries est venue de l'étude de leur ARN ribosomal.

3

Autre grande découverte, en 1977 le biologiste Américain Carl Woese démontre qu'il faut ajouter une 3^{ème} lignée de cellules qu'il appelle archéobactéries. Pour déterminer les relations de parenté entre les différents organismes du monde vivant il étudie une molécule universelle présente chez tous les êtres vivants, appelé ARN ribosomique 16S, un ARN des ribosomes, où s'élaborent les protéines. Il a comparé les différentes molécules de cet ARN véritable empreinte génétique : 2 organismes sont d'autant plus proches que les molécules de cet ARN se ressemblent. Cet ARN long de plus de 3000 nucléotides a évolué suffisamment lentement pour avoir gardé la trace d'évènements anciens. En étudiant des bactéries anaérobies productrices de méthane, Carl Woese eut la surprise de constater que leur empreinte génétique était éloignée des bactéries classiques, alors qu'il s'agissait pourtant de procaryotes. C'est ainsi qu'il démontra l'existence de 3 grandes lignées du monde vivant : Les bactéries qui sont des procaryotes, les eucaryotes et les archéobactéries, qui diffèrent donc par leurs ribosomes.

On a ainsi pu construire l'arbre universel de la vie : La longueur des branches séparant 2 organismes est d'autant plus petite que les séquences de leur ARN 16S se ressemblent. Le style de vie des archéobactéries rappelle les conditions qui auraient pu exister sur la terre il y a 3 milliards d'années avec une atmosphère sans oxygène, d'origine volcanique. En les appelant archéobactéries Carl Woese a pensé qu'il s'agissait probablement de cellules vivantes parmi les plus anciennes. En effet on a découvert toute une série d'archéobactéries qui vivent dans des conditions extrêmes, encore appelées extrémophiles, qu'on n'aurait pas imaginées il y a 30 ans : On peut citer les halophiles vivant dans des conditions d'hyper salinité qu'on trouve dans la Mer Morte. Parmi les acidophiles, *ferroplasma acidophilum* a été découvert en Russie en 2007 dans un réacteur alimenté par de la pyrite. Cette bactérie survit dans l'acide sulfurique et tire son énergie du sulfure de fer : Elle oxyde le fer de la pyrite et l'incorpore dans ses protéines. On a retrouvé ce microorganisme dans des zones volcaniques. On peut donc imaginer qu'il est apparu dans les conditions extrêmes qui existaient sur terre à l'origine de la vie et qu'il n'a pas évolué depuis. D'autres extrémophiles résistent aux hautes pressions, à de fortes doses de radioactivité, comme la bactérie *deinococcus radiodurans* capable de se reconstituer après une irradiation qui fragmente son ADN en plus de 150

fragments. Enfin il existe des archéobactéries qui vivent à des températures élevées, par exemple dans les sources chaudes du parc de Yellowstone et qui supportent entre 90° et 113° Celsius.

Les chercheurs se sont demandés comment ces bactéries hyperthermophiles pouvaient survivre à de telles températures car l'une des conséquences devrait être la dénaturation des protéines. Or ces bactéries sont encore capables de se diviser à des températures proches du point d'ébullition. C'est ce que l'on

4

constate au niveau des sources hydrothermales profondes découvertes en 1977, surnommées les fumeurs noirs, d'origine volcanique, par exemple dans les îles Eoliennes. Ces hyperthermophiles tirent leur énergie de l'hydrogène présent dans les vapeurs volcaniques.

Les chercheurs sont parvenus à expliquer leur mécanisme d'adaptation à ces hautes températures : L'étude de leurs protéines par diffraction aux rayons X a montré que ces molécules sont stabilisées par un plus grand nombre de liaisons électrostatiques. Leur ADN résiste à de hautes températures car la double hélice s'est enroulée sur elle-même. Au début des années 1980 l'Américain Martin Gellert a découvert qu'une enzyme la reverse gyrase était capable d'utiliser l'énergie de l'ATP pour forcer la double hélice d'ADN à cet enroulement et ainsi contrecarrer l'effet de la température.

Dans les années 1990 l'hypothèse que les premières cellules sont apparues à haute température au fond des océans a séduit beaucoup de chercheurs.

Or un certain nombre d'arguments sont venus récemment contredire cette hypothèse séduisante : Le biologiste Français Patrick Forterre a démontré que l'ancêtre commun des bactéries et des archéobactéries ne possédaient pas cette enzyme, la reverse gyrase, autrement dit ils ne pouvaient pas être hyperthermophiles. Ne possédant pas la reverse gyrase il est pratiquement sûr que le dernier ancêtre commun aux 3 lignées de l'arbre vivant n'était pas hyperthermophile. Ce dernier a dû se développer à une température plus clémente.

Nous arrivons donc à cette cellule ancestrale commune dont dérivent tous les êtres vivants que les anglo-saxons ont surnommé LUCA (Last Universal Common Ancestor). Aujourd'hui on peut établir son portrait robot : Cet ancêtre commun était une cellule procaryote anaérobie qui métabolisait le soufre en milieu acide. Elle contenait des chaînes de transport d'électrons et utilisait l'ATP. Il s'agissait plutôt d'une communauté de cellules, dotées de gènes courts qu'elles échangeaient entre elles.

Actuellement plus de 700 génomes complets ont été séquencés : La comparaison des génomes de bactéries, d'archéobactéries et d'eucaryotes a permis d'isoler 80 gènes universels certainement déjà présents dans la cellule ancestrale.

Parmi ces gènes universels la présence de gènes codant pour des protéines prouve que cet ancêtre était une cellule dotée de ribosomes puisqu'elle fabriquait des protéines.

Des recherches en génie génétique ont par ailleurs montré que le nombre de gènes minimum compatible avec la vie est d'environ 250.

Le monde à ARN : Pendant longtemps on a pensé que la cellule ancestrale possédait déjà un génome à ADN comme toutes les cellules vivantes actuelles. On sait que la réplication de l'ADN implique 3 catégories d'enzymes : une

5

hélicase, une primase et des ADN polymérases. Or ces 3 enzymes qui sont des protéines ne sont pas présentes dans la liste des protéines universelles.

C'est pourquoi il a été proposé par 2 chercheurs Russes Arcady Mushegian et Eugène Koonin que cette cellule ancestrale possédait encore un génome à ARN.

C'est ultérieurement qu'elle se serait dotée d'un génome à ADN. Le passage du génome ARN à un génome ADN fut relativement simple : A l'aide de 2 modifications chimiques de l'ARN, le remplacement d'une base azotée l'Uracile par la Thymine et une réduction du sucre de l'ARN le ribose en désoxyribose qui donne une plus grande stabilité. L'ADN est donc un ARN modifié.

Certains proposent que cette transformation a été accomplie par des virus : l'ADN aurait été inventé par des virus et ensuite transféré aux cellules primitives.

L'ADN apporte plusieurs avantages par rapport à l'ARN : Il a une plus grande stabilité chimique. Il permet de construire de plus grands génomes qui peuvent porter plus d'informations génétiques. En revanche l'ADN a perdu les capacités enzymatiques de l'ARN.

Il y a de nombreux arguments qui font que l'ARN a précédé l'ADN, notamment le fait que la réplication de l'ADN nécessite toujours une petite amorce d'ARN.

On a mis en doute que l'ARN ait précédé les protéines dans les cellules primitives jusqu'en 1981 lorsque le chimiste Américain Thomas Cech, prix Nobel de chimie découvre que les ARN ribosomiaux ont des propriétés catalytiques. La découverte de propriétés enzymatiques de l'ARN fut importante et prouve que l'ARN a précédé la synthèse des protéines.

A ce stade les gènes étaient longs seulement de 50 à 100 nucléotides. L'évolution s'est faite vers des gènes de plus en plus longs, des protéines plus complexes.

La cellule ancestrale commune aux 3 lignées était déjà le résultat d'une longue histoire évolutive, cellule beaucoup trop complexe pour qu'on puisse l'assimiler à l'origine de la vie.

Remonter aux origines de la vie soulève d'immenses difficultés : Depuis Aristote, la théorie prédominante sur cette origine qui s'est imposée comme un dogme pendant 2 millénaires fut celle de la génération spontanée. Il faudra

attendre 1862 pour que la vive controverse qui opposa Pasteur à Félix Pouchet se termine. Au XIX^e siècle beaucoup dont Pasteur furent des adeptes du vitalisme : Dans l'ignorance des mécanismes intimes de la vie, cette théorie considérait la vie comme de la matière animée d'un principe vital. Donc la vie ne devait pas être réductible aux lois physico-chimiques.

A la fin du XIX^e siècle apparaît la théorie de la panspermie soutenue par le physicien lord Kelvin, par Von Helmholtz et Arrhenius. Aujourd'hui elle a encore ses défenseurs. Pourtant on peut la considérer avec scepticisme en raison de l'action des rayons cosmiques sur les cellules ou les spores. De toute façon si

6

jamais elle était valide cela ne ferait que reporter ailleurs le problème de l'origine de la vie.

En 1953 la démonstration expérimentale du chimiste Américain Stanley Miller qu'un mélange gazeux réducteur simple simulant l'atmosphère terrestre primitive exposé à des décharges électriques pendant une semaine puisse produire plusieurs acides aminés et d'autres composés organiques suscita un grand enthousiasme. Dès lors de nombreux laboratoires vont s'intéresser à l'origine de la vie.

A la lumière de ces recherches peut-on aujourd'hui entrevoir ce qui s'est passé à l'origine, donc dans la période prébiotique ? De même que l'origine de notre univers a toutes les raisons de s'expliquer par des processus physiques, la plupart des biologistes défendent l'idée que la vie est née sur terre par suite de phénomènes physico-chimiques, dans lesquels le hasard fut omniprésent.

Première question, la vie serait-elle née par hasard ? Si la vie est née par une pure combinaison de phénomènes aléatoires comme le pensait le biologiste et Prix Nobel Jacques Monod pour qui « L'univers n'était pas gros de la vie », alors les probabilités de son apparition sont si infimes qu'on ne peut y voir qu'un évènement unique dans l'histoire du cosmos.

Mais aujourd'hui la majorité des biologistes, des biochimistes tel l'Américain Stuart Kauffman sont persuadés du contraire : A partir de simulations informatiques il a élaboré une série de réseaux autocatalytiques, donc généré des molécules de plus en plus complexes capables d'auto organisation. L'émergence de la vie a du commencer par l'élaboration de ces automates chimiques.

Pour le biologiste Belge Christian de Duve, Prix Nobel de Médecine en 1974, « La vie est une nécessité cosmique » : En effet les processus prébiotiques par leur nature chimique ont du suivre une voie déterministe et probablement reproductible ailleurs dans l'univers.

Avant de remonter le temps des évènements prébiotiques il est fondamental de rappeler en quoi consistent les capacités auto organisatrices des molécules pour mieux appréhender ce qui a pu se passer à l'origine de la vie.

L'organisation supra moléculaire joue un rôle fondamental en biologie : Il en a été ainsi à l'origine de la vie. La matière s'est auto organisée sous l'action des forces de gravitation dès l'origine de l'univers. Ensuite sur terre s'est produite une auto organisation de la matière sous l'influence des forces électromagnétiques. Toute association spécifique entre 2 molécules fait intervenir de l'information : Les molécules sont capables d'auto organisation. La chimie supramoléculaire ainsi dénommée en 1978 a valu au Français Jean-Marie Lehn le prix Nobel de Chimie en 1989.

7

Il a mis en évidence les phénomènes de reconnaissance entre molécules : Ainsi des virus comme les virus de la mosaïque du tabac par l'intermédiaire de protéines spécifiques situés sur leur membrane reconnaissent les cellules qu'ils vont infecter parce qu'elles sont elles-mêmes porteuses sur leur membrane de protéines complémentaires. Cette reconnaissance moléculaire avait été pressentie en 1894 par le chimiste Allemand Emil Fischer qui inventa l'image de la clé et de la serrure entre 2 molécules.

Les structures supramoléculaires ont été étudiées à l'aide de puissantes techniques d'analyse : La diffraction des rayons X, la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire.

On a pu mettre en évidence l'auto assemblage spontané de double hélice inorganique ou hélicate, par exemple le groupement 2-bipyridine en présence d'ions Cuivre. Il y a donc une grande analogie avec la structure en double hélice de l'ADN.

Les assemblages supra moléculaires peuvent aboutir à la formation de films ou de vésicules tels qu'on a du les voir à l'ère prébiotique.

Il y a donc une progression des structures supramoléculaires vers la complexité : L'assemblage supra moléculaire conduit à des systèmes capables de copie, de réplication. On a pu observer au laboratoire l'autoréplication d'oligonucléotides par autocatalyse.

Dans des systèmes chimiques auto répliquants utilisant 3 constituants de départ, il peut même se produire une compétition entre les constituants moléculaires et donc un processus de sélection. Tout le problème est effectivement de savoir si la sélection Darwinienne s'applique déjà à l'organisation moléculaire.

Les phénomènes de reconnaissance moléculaire, leur auto assemblage permettent de mieux appréhender les mécanismes chimiques à l'origine de la vie.

Le monde des protocellules à ARN était encore trop complexe pour avoir été à l'origine de la vie : Reconstituer le mécanisme de la vie prébiotique dont nous ne gardons aucune trace est une tâche ardue. Nous n'avons aucune certitude sur l'origine et le déroulement des premiers instants de la vie qui nous restera peut-être inaccessible.

Première difficulté on ne sait pas aujourd'hui comment s'est constitué l'ARN doué de réplication. Jusqu'à présent personne n'a réussi à synthétiser de l'ARN dans les conditions prébiotiques. Plusieurs systèmes précurseurs de l'ARN ont été recherchés au laboratoire par la biochimiste Française Marie-Christine Maurel : A l'époque prébiotique des composés plus simples que l'ARN comme le NTP ou desoxynucléoside Triphosphate ainsi que le N6-ribosyladenine ont pu être produit.

Le biochimiste Allemand Manfred Eigen, prix Nobel a expérimenté au laboratoire plusieurs mélanges de nucléotides avec une enzyme de réplication de

8

l'ADN : Après un temps d'observation variable plusieurs ARN de longueur différente sont apparus. Il s'en est suivi un processus de sélection moléculaire avec allongement des ARN à 150 nucléotides capables de s'autorépliquer.

La sélection Darwinienne s'applique donc à l'échelle supramoléculaire. Se peut il que dans un milieu riche en composés organiques soit apparue une telle molécule d'ARN, que l'on peut appeler un gène nu ?

Deux chimistes Danois Michael Ehgolm et Peter Nielsen ont décrit une nouvelle molécule alternative possible aux acides nucléiques l'APN ou Acide Peptique Nucléique, construit sur un squelette peptidique plus simple que l'ARN.

Le chimiste Ecossais Graham Cairn-Smith lui a testé l'hypothèse que des cristaux d'argile aient pu servir de matrice. Selon lui le précurseur génétique de nos acides nucléiques pouvait être de nature minérale.

Aujourd'hui 2 grandes hypothèses sont avancées pour reconstituer les origines de la vie : La première est celle de la soupe prébiotique : On doit cette idée au Britannique John Haldane. Toute une variété de molécules organiques auraient été produites par des processus chimiques aléatoires dans les océans.

La composition de l'atmosphère primitive de la terre reste débattue : On sait qu'il n'y avait pas d'oxygène. Un des arguments importants pour l'absence d'oxygène est le fait que de grandes quantités de fer ferreux se soient déposées au Précambrien sous forme de fer rubané. On sait que le fer ferreux ne se forme qu'en l'absence d'oxygène. Plus tard l'oxygène atmosphérique sera produit par la photosynthèse des cyanobactéries. L'atmosphère terrestre primitive était certainement riche en gaz carbonique libéré par l'activité volcanique, ainsi qu'en sulfure d'hydrogène. Elle était également composée de monoxyde de carbone, d'azote moléculaire probablement d'hydrogène et de méthane dont l'importance est contestée. Etait elle réductrice ou neutre ?

Une importante réaction prébiotique fut la formation de l'acide cyanhydrique (HCN) à partir de molécules de méthane et d'atomes d'azote sous l'action des rayons ultraviolets. Une autre synthèse prébiotique fut le formaldéhyde (HCHO) par réaction entre le méthane et la vapeur d'eau. Acide cyanhydrique et formaldéhyde furent à l'origine de bases azotées comme l'adénine et des premiers sucres.

L'énergie nécessaire à la vie primitive a pu venir de réactions d'oxydoréduction impliquant des composés inorganiques comme le sulfure d'hydrogène (H₂S) d'origine volcanique.

Le biochimiste Christian de Duve est persuadé que des thioesters formés à partir de groupements thiols et d'acide carboxylique dans un environnement volcanique riche en soufre ont été des sources d'énergie du protométabolisme, précurseurs de l'ATP.

9

Mais le milieu prébiotique soulève une critique : Pour se développer il aurait fallu des concentrations importantes de substances organiques. Or elles étaient probablement trop diluées dans l'océan primitif.

Pour l'Américain Carl Woese et l'Allemand Gunter Wachtshauer la conception d'une vie naissant dans une soupe prébiotique est invraisemblable. L'américain Robert Shapiro l'a même surnommé « Le mythe de la soupe prébiotique ».

C'est pourquoi une deuxième hypothèse fut proposée, celle d'un métabolisme primitif sur des surfaces minérales ; L'anglais John Desmond Bernal a proposé une solution alternative à la soupe prébiotique : Des associations moléculaires ont pu être catalysées par adsorption sur des feuillets d'argile très répandus sur la terre primitive. Les argiles composées de roches sédimentaires sont capables de retenir des substances par des liaisons électrostatiques.

Dans les années 1970 on a montré expérimentalement qu'une argile particulière la montmorillonite est capable de concentrer des aminoacides entre ses feuillets, de favoriser leur polymérisation en agissant comme des enzymes primitives.

Le rôle prébiotique de ce type d'argile a été confirmé au laboratoire par l'Américain Leslie Orgel : Il a réalisé la synthèse d'oligonucléotides d'une longueur supérieure à 50 monomères. Or la plupart des biologistes admettent que cette longueur permet à un système génétique primitif de s'auto répliquer.

L'Allemand Gunter Wachtshauer a proposé que le premier organisme biochimique était fait de molécules organiques chargées négativement, se développant sur une surface minérale positivement chargée constituée de pyrite. La pyrite tapisse les parois des cônes volcaniques, source d'électrons et d'énergie elle se forme par réaction du sulfure de fer avec l'hydrogène sulfureux et se trouve en abondance au voisinage des sources chaudes sous-marines.

Le chimiste Britannique Graham Cairn-Smith a même proposé que la vie soit née directement au sein du monde minéral. Des gènes minéraux peut-être argileux auraient eu la propriété de former des structures répliquatives susceptibles d'évoluer.

Ces organismes primitifs constitués de molécules organiques autocatalytiques se développant sur des surfaces minérales constituent aujourd'hui une voie de recherche intéressante de la chimie prébiotique.

Mais alors comment savoir à partir de quand les processus métaboliques prébiotiques ont été enfermés par une membrane dans une protocellule ?

Pour Christian de Duve il est probable qu'une sorte de protocytosol siège d'un métabolisme ayant atteint le stade de la synthèse protéique ait précédé la compartimentalisation. Au contraire plusieurs chercheurs dont Carl Woese pensent qu'il y a eu des protocellules dès l'origine pour des raisons énergétiques. Or la formation de membranes imperméables aux grosses molécules laissant passer des nutriments et des déchets est d'une grande

10

complexité. Au laboratoire on sait fabriquer par émulsion d'acide gras dans l'eau de petites vésicules ou liposomes. On sait les faire croître.

Deux solutions originales ont été imaginées à l'origine des membranes cellulaires : Le biophysicien Français André Brack a proposé l'apparition d'automates chimiques protégés par des semi membranes de phospholipides posées sur des surfaces minérales. Ces structures en grossissant font des boursouflures et finissent par se détacher en protocellules autonomes. L'Allemand Gunter Blobel, prix Nobel de médecine a récemment proposé une solution ingénieuse au problème de l'imperméabilité des premières membranes cellulaires : Il suppose que les premières vésicules étaient vides. Sur leur paroi se seraient fixés des organites comme les ribosomes et le matériel génétique primitif. Ces vésicules auraient fini par se replier autour de ces organites qui leur étaient attachés pour se refermer formant ainsi une membrane faite d'une bi couche de lipides.

On connaît l'existence de bactéries surnommées bactéries L qui n'ont pratiquement pas de paroi cellulaire et prennent donc une forme sphérique. Elles sont très vulnérables aux variations du milieu extérieur. Ce sont probablement des vestiges des premiers temps de la vie

En conclusion, étudier l'origine de la vie comme celle de l'univers sont deux sujets qui continueront de fasciner les hommes. Malgré beaucoup d'incertitudes nous avons progressé en un demi-siècle sur le mécanisme de l'origine de la vie. Elle découle certainement de processus physicochimiques par étapes.

Si la terre s'est formée il y a 4,5 milliards d'années nous savons que la vie est apparue environ 800 millions d'années plus tard il y a plus de 3 milliards 500 millions d'années sous la forme de cellules procaryotes, au départ anaérobies : On s'est rendu compte récemment qu'il y a 3 milliards d'années ces procaryotes étaient déjà diversifiés. C'est alors que ce sont développées des cellules procaryotes dotées d'une activité photosynthétique les cyanobactéries qui ont progressivement enrichi l'atmosphère en oxygène.

Il a fallu plus d'un milliard d'années de sélection Darwinienne pour que les cellules procaryotes donnent naissance aux cellules eucaryotes : Les premiers

eucaryotes fossilisés connus les grypanias datés de 2,2 milliards d'années sont de la famille des algues, d'abord uni et ensuite pluricellulaires.

L'évolution de la vie sur terre s'est donc faite sous forme unicellulaire pendant longtemps : Jusqu'à présent les premiers êtres pluricellulaire étaient datés de 600 millions d'années, donnée remise en cause par la découverte récente de fossiles Gabonais.