

L'origine de la Vie sur Terre et la Vie dans l'Univers

Cette conférence fut donnée le 10 avril 2003 à l'Observatoire Midi-Pyrénées de Toulouse, France, par *André Brack*, Directeur de l'Equipe Exobiologie du Centre de Biophysique Moléculaire d'Orléans. En voici le compte-rendu ...

★Introduction

Notre Terre est âgée de quelques 4,5 milliards d'années. Trois cents millions d'années environ après sa formation, sa surface était déjà recouverte de protocontinents et d'océans. Des océans primitifs au sein desquels la vie se développa. Une vie chimique, sous la forme d'*automates* (agencement de molécules) capables, par autocatalyse, de se reproduire et d'évoluer ; en d'autres termes, d'augmenter en nombre, en complexité et en diversité - conditions nécessaires à survivre aux cataclysmes naturels (séismes, éruptions volcaniques, bombardements météoritiques, ...). *"Des têtes sans jambes, des jambes sans têtes, des bras, des torsos, jonchaient autrefois la surface de la Terre. Un jour, par hasard, tous les éléments nécessaires à la constitution d'un être humain se rencontrèrent et s'auto-organisèrent"*. Ainsi naquit, selon Empédocle d'Agrigente, le tout premier être vivant.

Au sein de sédiments terrestres situés en eau peu profonde, au Groenland (à Isua et Akilia), en Australie (dans la ceinture de roches vertes de Pilbara) et en Afrique du Sud (dans la ceinture de roches vertes de Barbeton), furent découverts les fossiles des automates les plus anciens. Les sédiments d'Isua et Akilia, datés de 3,8 milliards d'années avant notre ère, témoignent ainsi de la présence permanente d'eau liquide, de gaz carbonique dans l'atmosphère, et renferment des kérogènes - ces molécules organiques complexes dont l'enrichissement en carbone 12 s'expliquerait par l'origine biologique des sédiments en question. Les sédiments australiens, datés de 3,4 milliards d'années, témoignent quant à eux d'une vie microbienne diversifiée - onze variétés différentes ont en effet été détectées -, voire photo-synthétique. Dans des dépôts de jaspe formés à quelques mille mètres de profondeur furent enfin retrouvés des fossiles filamenteux vieux de 3,23 milliards d'années. Sans doute constituent-ils les vestiges de bactéries thermophiles ayant vécu à proximité de sources hydrothermales, à des températures comprises entre 30 et 80°C. Des bactéries anaérobies tirant leur énergie et les éléments nutritifs nécessaires à leur survie des composés chimiques (oligoéléments) présents dans le fluide hydrothermal.

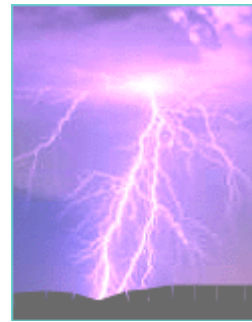
En raison de la tectonique des plaques (source de sismicité et de volcanisme), de l'inexistence de filtre UV atmosphérique (entre -4 et -2 milliards d'années) également ; enfin, d'une forte érosion fluviale (la vie produit beaucoup d'oxygène que l'atmosphère évacue sous forme de pluies), l'espoir de trouver des sédiments plus anciens est mince, très mince. Aussi les chercheurs recourent-ils aux expériences en laboratoire, tentant de recréer la vie originelle en tube à essais sur la base de telle ou telle hypothèse. L'une de ces hypothèses consiste à supposer l'origine organique des pièces des petits automates chimiques auto-reproducteurs ainsi que de leurs précurseurs, les *molécules prébiotiques*. Ces toutes premières structures vivantes auraient ainsi principalement consisté en un assemblage d'atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. Leur constitution aurait résulté de l'action de diverses sources d'énergie (décharges électriques, rayonnement UV ou cosmique, chaleur) sur des molécules carbonées gazeuses (méthane, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone) et azotées (azote, ammoniac) ; leur diffusion, de l'interaction de ces molécules organiques avec les molécules d'eau, omniprésentes sous formes solide (glace) et gazeuse (vapeur) dans le cosmos.

★Les environnements propices à l'émergence de la vie

Les molécules prébiotiques se seraient ainsi formées dans des milieux riches en composés carbonés, azotés et en eau, dont les conditions physiques auraient favorisé leurs interactions. L'*atmosphère terrestre primitive* aurait-elle pu constituer ce réacteur chimique propice à la synthèse des molécules organiques nécessaires à l'émergence de la vie ? Telle est la question que souleva le biochimiste russe Alexandre Oparin, en 1923. Une question à laquelle le chimiste américain Stanley Miller apporta un début de réponse, quelques trente années plus tard. Ce dernier remplit un ballon d'un mélange réducteur de méthane, d'ammoniac, de di-hydrogène et de vapeur d'eau, qu'il soumit à l'action d'un arc électrique censé reproduire les orages secouant l'atmosphère terrestre primitive. Le formaldéhyde, l'acide cyanhydrique, la glycine et trois autres acides aminés entrant dans la composition des protéines figuraient parmi les composés ainsi formés. Depuis, 17 des 20 acides aminés constituant les protéines ont été isolés ; de même, certains des éléments constitutifs des acides nucléiques. Toutefois, l'atmosphère terrestre primitive, tout comme celle de Vénus et Mars d'ailleurs, semble avoir été majoritairement constituée de dioxyde de carbone - ce composé carboné qui, mélangé à l'ammoniac, au di-hydrogène et à la vapeur d'eau, puis soumis à un arc électrique, produit très peu d'acides aminés. D'où la recherche d'autres milieux réactionnels, riches en méthane ou en hydrogène, susceptibles de produire les acides aminés en grand nombre.

Les *événements hydrothermaux*, ces sources sous-marines riches en oxyde de carbone, en dioxyde de carbone, en méthane, en hydrogène, en azote, en anhydride sulfureux et en hydrogène sulfuré, constamment alimentées en énergie thermique par le magma terrestre qui plus est, pourraient avoir constitué un milieu favorable à la synthèse des molécules prébiotiques, et donc à l'émergence des toutes premières formes de vie. Des traces d'acides aminés ont effectivement été obtenues en laboratoire en soumettant un mélange de méthane et d'azote aux conditions physico-chimiques régnant dans ces fumeurs noirs.

Les *comètes*, ces objets célestes qui se déplacent sur des orbites instables et succombent parfois au champ gravitationnel d'une planète, telle la comète Schoemaker-Levy 9 qui entra en collision avec Jupiter en 1994, ont pu apporter de très importantes quantités de matière organique extraterrestre et fournir une grande fraction de l'eau terrestre. Les observations effectuées depuis la Terre et grâce aux sondes Véga et Giotto, ont effectivement montré que la comète de Halley, tout comme celles de Hyakutake et Hale-Boppe d'ailleurs, était riche en matériau organique : parmi les molécules d'intérêt prébiotique figurent l'acide cyanhydrique, le formaldéhyde, l'acétonitrile, le cyanoacétylène, l'acide isocyanhydrique et l'acide isocyanique. Les missions spatiales à venir devraient permettre de généraliser ce résultat - d'augmenter la probabilité de l'origine extraterrestre



Lors d'un orage, de multiples éclairs générés par la différence de potentiel entre le sol et la couche d'air atmosphérique, inondent le ciel.



L'existence de ce fumeur noir témoigne d'une forte activité volcanique et magmatique. Il déverse dans l'eau de mer de grandes quantités d'oligoéléments que la microfaune bactérienne transforme en éléments organiques.



La comète de Hale-Boppe

de la vie terrestre, donc.

Parce qu'elles renferment de nombreux composés organiques d'intérêt biologique - des acides carboxyliques, des acides aminés, des hétérocycles azotés, des amines, des amides, des alcools,... -, certaines météorites carbonées appelées *chondrites* sont également susceptibles d'avoir acheminé la vie sur Terre. La météorite de Murchison renferme ainsi près de 70 acides aminés différents, parmi lesquels figurent 8 acides aminés protéiques.



La météorite carbonée
de Murchison

Chaque année, la surface terrestre reçoit près de 100 tonnes de météorites carbonées. Ce qui est bien peu comparé aux quelques 20 000 tonnes annuelles de *micrométéorites*, ces grains interplanétaires apparentés aux météorites les plus primitives - celles du groupe des chondrites carbonées -, dont le diamètre varie entre 50 et 500 microns (1 micron = 0,000001 mètre) ! L'on estime ainsi à 100 tonnes, la quantité de carbone acheminée chaque année par ces micrométéorites sur Terre. Sans doute cette quantité était-elle voisine de 30 000 milliards de tonnes lors de la phase active du bombardement terrestre, soit entre -4,1 et -3,8 milliards d'années. Le flux de micrométéorites était alors mille fois plus intense qu'aujourd'hui. De nombreux prélèvements effectués dans les glaces du Groenland et de l'Antartique ont révélé la présence d'acides aminés, de sulfures métalliques, d'oxydes, d'argiles, ... en leur sein. Diverses expériences spatiales (BIOPAN-1, ...) ont par ailleurs montré le rôle de film UV-protecteur joué par les argiles vis à vis des acides aminés, accréditant par là-même la théorie selon laquelle ces derniers auraient survécu aux épreuves du voyage interstellaire. Ainsi les acides aminés, qui entrent dans la constitution des pièces d'automates, pourraient-ils être d'origine extraterrestre.

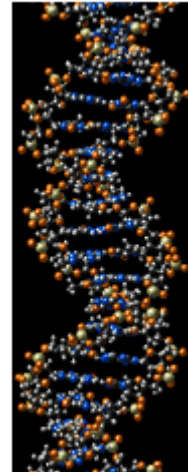
★La cellule : premier automate chimique ?

A la lueur de données contemporaines, il apparaît que ces pièces d'automates ne seraient autres que les éléments constitutifs d'une cellule, à savoir les molécules de compartimentation, d'information et de catalyse.

Les *molécules de compartimentation* ou molécules amphiphiles, composées d'une tête hydrophile (soluble dans l'eau) et de chaînes carbonées hydrophobes (très peu solubles dans l'eau), s'assemblent pour former la membrane de la cellule et garantir ainsi sa cohésion. Des structures cloisonnées semblables à des membranes cellulaires ont effectivement été obtenues en plongeant diverses substances organiques extraites des météorites de Murchison et Allende en milieu aqueux.

Les *molécules d'information* portent quant à elles l'information génétique en leur sein - soit le plan de montage et de réplication à l'identique (ou presque) de la cellule mère. Ce sont les acides nucléiques, constitués d'une chaîne de nucléotides. Chaque nucléotide se compose d'un sucre - ribose pour l'ARN, désoxyribose pour l'ADN -, d'une base hétérocyclique - purique A, G ou pyrimidique T, U, C -, et d'un groupe phosphate. L'établissement de liaisons hydrogène se traduit par l'appariement préférentiel des bases, qui aboutit à la configuration bi-hélicoïdale stable de l'ADN et lui offre la capacité de s'auto-réplicuer : ses deux brins polynucléotidiques complémentaires, une fois séparés, constituent en effet la matrice nécessaire à synthétiser une nouvelle chaîne, quasi-identique à la première - l'erreur de réplication ne concernant qu'un acide aminé sur 10 000 !

Parce qu'ils sont considérés comme plus anciens - plus primitifs, donc -, les acides nucléiques à ribose (ARN) font l'objet de reconstitutions en laboratoire : la synthèse de sucres s'effectue à partir de formaldéhyde ; les bases puriques A, G sont obtenues à partir de l'acide cyanhydrique ; enfin, le phosphore est extrait des roches ignées terrestres. Cet élément est également présent dans les météorites carbonées, sous forme de chlorapatite. Le formaldéhyde et l'acide cyanhydrique se trouvent quant à eux au sein des comètes. Sans doute abritent-elles donc, au même titre que les chondrites, les bases puriques A,G et pyrimidiques T, U, C. Des deux, seules les premières ont pu être combinées, sous l'effet de la chaleur, au ribose et au groupe phosphate, pour former un nucléotide. En d'autres termes, aucune synthèse de nucléotide à base pyrimidique n'a pu être réalisée.



La molécule d'ADN, dans sa configuration bi-hélicoïdale stable

Au rang des *molécules catalytiques*, l'on trouve une argile, responsable de la condensation des nucléotides. Cette élimination d'une molécule d'eau entre le sucre et le groupe phosphate se traduit par la fabrication de chaînes de nucléotides et, par voie de conséquence, d'acides nucléiques. L'appariement des nucléotides complémentaires - à base purine G et à base pyrimidine C, par exemple - conduit ensuite à la formation d'une double hélice ; une nouvelle condensation, à la création de liaisons naturelles entre les brins de nucléotides.

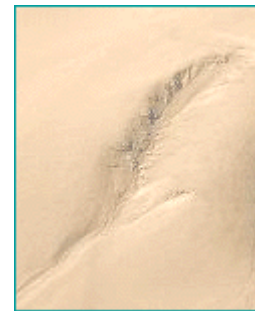
Les expériences de *réplication chimique* menées par Leslie Orgel ont montré que l'effet de matrice ne s'exerce qu'à partir d'une matrice préformée dont plus de 60% des nucléotides sont à base pyrimidique. Les matrices à purine sont incapables en effet de diriger la synthèse des nucléotides. En celà, elles peuvent être qualifiées de stériles. En outre, cette réplication ne s'effectue qu'en présence de molécules bien particulières. Elle requiert donc des conditions physico-chimiques probablement inexistantes sur la Terre primitive. Toutefois, des expériences récentes, menées par les biologistes américains Thomas Cech, Gerald Joyce et Jack Szostak, ont suggéré que certains ARN étaient capables, non seulement de véhiculer l'information, mais également d'exercer une activité catalytique semblable à celle exercée par les enzymes protéiques - ces protéines chimiquement actives constituées d'une vingtaine d'acides aminés assurant la copie de l'information portée par l'ADN d'une cellule contemporaine. Ainsi l'ARN contribue-t-il, dans certaines conditions - dans les conditions de trempe thermique régnant à proximité des sources chaudes sous-marines, notamment -, à la synthèse de chaînes peptidiques constituées de plusieurs acides aminés, soit à la biosynthèse des protéines. Progressivement, l'on s'achemine donc vers un monde d'ARN, antérieur à la cellule, dont seraient probablement issus les virus. Un monde d'ARN, berceau de la vie sur Terre, vraisemblablement généré par des systèmes catalytiques qui se

seraient formés dans un milieu aqueux riche de substances organiques (carbone, hydrogène, oxygène, azote).

★A la recherche de traces de vie extraterrestre

Au vu des multiples conditions nécessaires à l'apparition de la vie sur Terre, celle-ci pourrait bien être le fruit d'un miracle ou d'un heureux hasard ... à moins qu'elle résulte plutôt de la combinaison d'agents permanents, survivant à chaque cataclysme (séismes, éruptions volcaniques, ...). Ainsi, dès lors que les conditions physico-chimiques se trouveraient de nouveau réunies, chacun des automates chimiques serait-il susceptible de se reconstituer. Une telle hypothèse, si elle s'avérait exacte, attribuerait un caractère répétitif et universel à l'émergence de la vie - en aucun cas exceptionnel, encore moins réservé à notre seule et unique planète Terre. Afin d'en examiner la plausibilité, étudions le cas de plusieurs planètes et satellites de notre système solaire... à commencer par *Mars*.

Les missions Viking 1 et 2, Mars Pathfinder et Mars Global Surveyor ont clairement mis en évidence l'existence passée d'eau liquide à la surface de la planète rouge. L'existence de cet écoulement permanent à si grande distance du Soleil présupposait l'existence d'une atmosphère suffisamment dense pour générer un effet de serre important - hypothèse qui fut confirmée par la mission Mars Odyssey. Cette mission révéla par ailleurs la présence d'hydrogène à proximité des pôles et d'eau sous forme de glace à moins d'un mètre de profondeur. Sans doute cette eau contient-elle, aujourd'hui encore, les traces de micro-organismes importés par des micrométéorites. Des micro-organismes dont les sondes Viking 1 et 2 n'ont certes pas trouvé de vestiges à la surface de la planète - et ce, en raison de l'oxydation produite par le rayonnement ultraviolet solaire -, mais que la mission Mars Express devrait mettre en évidence. Des échantillons prélevés sur des météorites martiennes (EETA 79001 et ALH 84001) se sont effectivement révélés porteurs de molécules organiques. De là à conclure l'existence passée d'une vie bactérienne sur Mars, il y a un grand pas, que diverses expériences de stratigraphie et d'analyse in situ pourraient bien permettre de franchir. Seront plus particulièrement examinés les échantillons de sédiments océaniques situés à l'abri des rayons ultraviolets et des oxydants, susceptibles donc de renfermer des molécules organiques et des bactéries fossilisées, voire endormies... et pourquoi pas vivantes !



Traces de sillons sur Mars, provoquées par un écoulement fluide

Autre candidat susceptible d'avoir abrité la vie, voire de l'abriter, encore aujourd'hui : *Europe*, l'une des lunes de Jupiter. A la fin des années soixante-dix déjà, la mission Voyager avait mis en évidence, sur sa surface, l'existence de mers de glace entaillées de larges crevasses. Les images plus récentes du satellite Galileo montrent des blocs de glace pivotant sur eux-mêmes, suggérant par là-même l'existence d'un sous-sol fluide. Peut-être un océan d'eau liquide, situé sous la banquise ? Un océan dont la fluidité résulterait des fortes marées générées par les variations du champ gravitationnel de Jupiter. Un océan susceptible d'abriter la vie. Un transfert de chaleur du cœur satellitaire vers la surface suffirait en effet à générer des événements hydrothermaux semblables aux fumeurs terrestres, au sein desquels s'effectue la synthèse des molécules organiques - ou prébiotiques.

Si les conditions d'émergence de la vie sur Mars et Europe paraissent semblables à celles de la Terre, tel n'est pas le cas de *Titan*. Le plus gros satellite de Saturne possède en effet une atmosphère dense

constituée d'azote (90%), de méthane, d'hydrogène, d'aérosols organiques (acide cyanhydrique, acétylène, cyanoacétylène, ...) et de vapeur d'eau, en équilibre avec des océans de méthane et d'éthane liquide. Les conditions chimiques seules suffisent à la création d'éléments prébiotiques. Les conditions physiques de surface (température voisine de -180°C) interdisent toutefois la présence d'eau liquide et, par voie de conséquence, l'émergence d'une vie de type terrestre ou martienne ou européenne. Vers quels systèmes complexes ces molécules organiques évolueront-elles donc ? La mission Cassini-Huygens devrait lever en partie le voile de ce mystère ...

Au sein des vastes nuages de gaz et de poussières interstellaires ont été identifiées quelques 110 molécules différentes : 83 d'entre elles contiennent du carbone, 7 autres du silicium. La chimie du carbone semble donc universelle - et bien plus inventive que celle du silicium. Ne reste donc plus qu'à détecter, à la surface des planètes extra-solaires, des océans d'eau liquide susceptibles d'abriter la vie ...